

무선 전력 전송 센서 네트워크에서 다중 접속에 따른 정보 및 전력 전송 기법 연구

이성복*, 이종혁*, 박재현^o

A Study on the Information and Power Transfer Strategies with Multiple Access in Wireless Powered Sensor Networks

Sung-bok Lee*, Jongheok Lee*, Jaehyun Park^o

요약

본 논문은 무선 전력전송 센서 네트워크(Wireless Powered Sensor Network, WPSN)환경을 고려하여, 다중 노드들의 접속 방식에 따른 정보 및 전력 전송 전략들을 비교 분석한다. 즉, Downlink(DL)구간에서는 Access Point(AP)가 다중안테나를 이용해 에너지를 센서노드들로 전송하며 Uplink(UL)구간에서는 센서들이 DL구간에서 채집한 에너지를 이용하여 센싱한 데이터를 AP에 전송한다. WPSN에서 무선전력 전송을 통해서 센서노드의 에너지 고갈현상을 완화 할 수 있지만 에너지 최소화 전략은 여전히 중요한 이슈로 남아있다. WPSN에서 요구되는 에너지는 AP에서 다중 노드들로 전송하는 에너지와 같다. 따라서 본 논문에서는 WPSN에서 AP의 총 전송 에너지를 최소화 시키는 최적화 알고리즘을 제안한다. 또한, 센서 노드들의 다중 접속 방식에 따른 UL/DL 시간분배 및 송신 에너지신호의 공분산행렬, 그리고 정보 수신 빔포밍 벡터 등을 최적화하는 기법을 제안하며, 전송 전략에 따른 요구 에너지를 비교하였으며, 모의 실험을 통해 성능을 검증하였다.

Key Words : Wireless Powered Communication Network, Wireless Sensor Network, Energy beamforming, Energy minimization

ABSTRACT

In this paper, we consider wireless powered sensor networks (WPSNs), where the access point (AP) with multiple antennas transmits energy signal to multiple nodes which can harvest energy from the RF signal in the downlink (DL) and then, the nodes send their sensing data to the AP by exploiting the harvested energy in the uplink (UL). We consider the energy minimization to support the WPSN. To minimize the total transferred energy, the UL/DL time allocation and the covariance matrix of the transmit energy signal at AP are jointly optimized when TDMA and SDMA are, respectively exploited for the multiple access in DL. Because the associated energy minimization problem is non-convex, we develop iterative algorithms to solve it. Through the computer simulations, the performance of the proposed algorithm is demonstrated.

※ 이 논문의 일부는 부경대학교 자율창의기술연구비(2016년)에 의하여 연구되었습니다.

♦ First Author : Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, pa339@naver.com, 학생회원

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

* Pukyong National University, Department of Electronics Engineering

논문번호 : KICS2017-07-195, Received July 8, 2017; Revised September 18, 2017; Accepted September 20, 2017

I. 서론

무선 센서 네트워크는 다수의 저비용 센서 노드를 통해 객체 지향 데이터를 감지 / 수집 할 수 있는 가능성 때문에 IoT, 스마트 그리드 및 다양한 기계 대 기계 애플리케이션 등에 적용된다. 센서 노드는 일반적으로 배터리가 제한되어 있기 때문에 무선 센서 네트워크의 에너지 고갈을 극복하기 위해 에너지를 무선으로 수집 할 수 있는 센서 노드의 배치가 연구 되어 왔다¹⁻³⁾.

이 논문에서는 Access point(AP)가 다중 안테나를 이용하여 Downlink (DL)동안 센서 노드에게 에너지를 무선으로 전송하고, 센서노드들은 DL에서 채집한 에너지를 이용하여 센서노드들이 센싱한 데이터를 Uplink(UL)동안 데이터를 수집하는 AP에 전송하게 된다. 대부분의 선행 연구에는, 이러한 Wireless Powered Sensor Network(WPSN)에서 전송률을 최대화하기 위한 연구에 집중되어 있다.⁴⁻⁸⁾ 본 논문에서는 선행연구들과 달리 WPSN에서 각 노드들의 최소 전송속도를 보장하는 제약 조건하에서 필요한 총 에너지 최소화 문제를 다룬다. 즉, WPSN을 지원하는 데 필요한 에너지가 AP에서 전송되는 에너지와 같기 때문에 센서 노드에서 데이터 속도의 제약 하에 전송 에너지가 최소화되는 최적화 알고리즘을 제안한다. 이때 UL/DL시간할당과 송신 에너지 빔포밍 신호의 공분산행렬을 최적화 변수로 두어 최적화 할 수 있다. 하지만 이 최적화 문제는 non-convex이기 때문에, 이를 효과적으로 풀기 위한 알고리즘을 제시한다. 특히 UL에서 다중 센서 노드들이 정보를 전송하기 위해 다중접속 방식에 따른 장단점 및 요구되는 에너지 차이를 비교 분석한다.

이 논문의 나머지부분들은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 이 논문에서 고려한 시스템모델을 소개한다. 3장에서는 센서네트워크를 유지하는데 필요한 에너지를 최소화하는 최적화 문제를 제시하고, 이를 풀기 위한 알고리즘을 제시한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과들을 논의하며, 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 무선 전력전송 센서네트워크모델을 나타내고 있다. 즉, AP는 M개의 안테나를 이용하여 DL동안(τT) 에너지를 무선으로 다중 센서 노드들로 전달하며, UL 동안 $((1-\tau)T)$ 다중 센서 노드들이 전달하는 정보를 수신한다. 다시

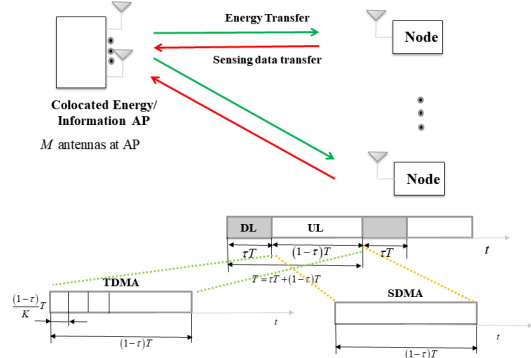


Fig. 1. System model of WPSN

말해, UL과 DL을 한 구간씩 합친 주기를 T 라 정의 하며, 이 한 주기동안 DL의 비율 (즉, 에너지 채집 구간 비율)이 $\tau (0 \leq \tau \leq 1)$ 가 된다. 다중 센서노드들은 DL동안 에너지를 채집하며, UL동안 센싱한 데이터들을 DL동안 채집한 에너지를 활용하여 AP로 전송한다. 이때 UL동안 다중 노드들이 정보를 AP에 전송하기 위해 다중 접속 방식을 시분할 다중접속(TDMA)와 공간분할 다중접속(SDMA)로 나누어서 고려한다.

이때, DL에서 k번째 노드의 에너지 수신신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_k = P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{v}_E + n_k, \quad (1)$$

여기서, AP로부터 k번째 노드간의 채널은 $\mathbf{h}_k^H \in \mathcal{C}^{1 \times M}$ 으로 나타내며, 타임블록 T동안 일정하다. 또한, P_{Tx} 는 AP의 송신전력이며, \mathbf{v}_E 는 에너지 빔포밍벡터이며 $\|\mathbf{v}_E\| = 1$ 이다. 이때 AP의 송신전력은 구현제약 또는 스펙트럼 규제 정책 등의 이유로 $P_{Tx} \leq P_{max}$ 의 조건을 만족해야한다. 그리고 n_k 는 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 가우시안잡음이다.

따라서 k번째 노드가 채집한 에너지는 $E_k = \xi \tau T P_{Tx} E[|y_k|^2] \approx \xi \tau T P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k$ 로 주어진다. ξ 는 에너지 변환 효율을 나타낸다. \mathbf{Q}_v 행렬은 에너지 빔포밍신호의 공분산행렬이고, $\mathbf{Q}_v = E[\mathbf{v}_E \mathbf{v}_E^H]$ 으로 주어진다.

UL에서는 다중 접속 방식에 따라 수신 신호 모델이 달라지는데, TDMA를 쓸 경우 k번째 노드가 정보를 송신할 때, 다른 노드들의 간섭이 없게 된다. 따라서 AP에서 수신신호는 다음과 같이 모델링 된다.

$$\mathbf{y}_{U,k} = p_k \mathbf{g}_k^H s_{U,k} + n_{U,k} \quad (2)$$

이때, p_k 는 k 번째 노드의 송신신호이며, $s_{U,k}$ 는 $\|s_{U,k}\| = 1$ 를 만족하는 k 번째 노드의 정보 신호이다. 본 논문에서는 UL과 DL 채널은 상호 대칭 관계 (reciprocity, $\mathbf{g}_k^H = \mathbf{h}_k$)에 있다고 가정하였으나, 서로 비대칭 적인 채널($\mathbf{g}_k^H \neq \mathbf{h}_k$)에 대해서도 쉽게 확장이 가능하다. $n_{U,k}$ 는 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 가우시안잡음이다. SDMA의 경우, K 개의 노드들이 시간적으로 동시에 AP에 정보 신호를 송신하므로 수신신호는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K p_k \mathbf{h}_k^H s_{U,k} + n_U \quad (3)$$

n_U 는 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 가우시안잡음이다. 본 논문에서는 표현을 간단하게 나타내기 위해 $\xi = 1$, $T=1$ 이라 가정하지만, 일반적인 ξ 값 및 T 값에 대해 쉽게 확장이 가능하다.

III. WPSN 에너지 최소화

II장에서 살펴본 시스템 모델에서 DL동안(τ) 채집한 에너지를 활용하여, UL동안 $((1-\tau))$ AP로 정보를 전송하기 때문에, τ 에 따라 정보 전송 시간 및 센서 노드들의 전력이 달라진다. 또한 정보 전송시 센서 노드들의 다중 접속 방식에 따라 다른 노드에 의한 간섭 및 노드의 정보 전송율이 달라진다. 따라서 본 장에서는 두 가지 다중 접속 방식에 대해 각각 정보 전송률 최적화 문제를 세운다. 그리고 정보 전송률을 최대로 하는 τ 및 빔포밍신호의 공분산행렬 등의 파라미터를 구하는 알고리즘을 제시한다.

3.1 TDMA기반 에너지 최소화

TDMA를 이용할 경우, 노드들 간의 간섭이 없으므로, 정보전송구간 $(1-\tau)$ 동안 k 번째 노드 전송률 (bps/Hz)은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{k,TDMA} = \frac{1-\tau}{K} \log_2(1 + \gamma_{k,TDMA}), \quad (4)$$

즉, 노드들은 $(1-\tau)$ 를 K 개의 동일한 시간 슬롯으로 나눠서 전송한다. γ_k 는 k 번째 노드의 수신SNR이

고, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{k,TDMA} = \frac{p_k |\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{\sigma_n^2} = \frac{p_k \|\mathbf{h}_k\|^2}{\sigma_n^2} \quad (5)$$

여기서 p_k 는 k 번째 노드가 사용가능한 전력을 나타낸다. 이는,

$$p_k \leq P_k = \frac{E_k}{(1-\tau)/K} = \frac{\tau K P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k}{1-\tau} \quad (6)$$

로 주어지며 \mathbf{w}_k 는 k 번째 노드의 정보 수신 빔포밍 벡터를 나타내며 maximum ratio combining(MRC)를 이용할 경우 $\mathbf{w}_k = \frac{\mathbf{h}_k}{\|\mathbf{h}_k\|}$ 이다.

센서노드들은 데이터를 전송하기 위해 AP가 에너지를 전송해야하기 때문에 WPSN을 유지하기 위해 필요한 총 에너지는 τP_{Tx} 로 주어진다. 따라서 네트워크를 유지시키기 위해 필요한 에너지를 최소화하는 최적화 문제는 다음과 같이 세울 수 있다.

$$\begin{aligned} (P1) \quad & \underset{\mathbf{Q}_v, P_{Tx}, \tau}{\text{minimize}} \quad \tau P_{Tx} \\ & \text{subject to} \\ & \frac{1-\tau}{K} \log_2(1 + \frac{p_k \|\mathbf{h}_k\|^2}{\sigma_n^2}) \geq R_{\min}, \\ & p_k \leq \frac{\tau K P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k}{1-\tau} \text{ for } k = 1, \dots, K \\ & 0 \leq \tau \leq 1, \\ & \text{tr}(\mathbf{Q}_v) = 1, \mathbf{Q}_v \geq 0, P_{Tx} \leq P_{\max}. \end{aligned}$$

(P1)의 첫 번째 제약조건은 센싱한 데이터를 AP로 전송하기 위해서는 각 센서노드의 데이터 전송률이 최소 임계값(R_{\min})보다 커야 한다는 것을 의미한다. 참고로 (P1)은 non-convex이므로 이를 완화하기 위해

$$(P1) \text{의 두 번째 제약 조건을 } p_k = \frac{\tau K P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k}{1-\tau}$$

으로 대체하여 변수 p_k 를 제거하고 (P1-I)로 변환할 수 있다.

$$(P1-I) \quad \min_{\mathbf{Q}_v, P_{Tx}, \tau} \quad \tau P_{Tx}$$

subject to

$$\frac{1-\tau}{K} \log_2 \left(1 + \frac{\tau K P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k \|\mathbf{h}_k\|^2}{(1-\tau)\sigma_n^2} \right) \geq R_{\min},$$

for $k = 1, \dots, K$, $0 \leq \tau \leq 1$,

$$tr(\mathbf{Q}_v) = 1, \mathbf{Q}_v \geq 0, P_{Tx} \leq P_{\max}.$$

참고로, 완화된 (P1-I) 문제의 최적화문제는 (P1) 문제의 최적해이다. 이는 $p_k = \frac{\tau K P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k}{1-\tau}$ 에서의 해가 (P1)의 최적해가 아니면, 에너지 빔포밍벡터(\mathbf{Q}_v)와 P_{Tx} 를 동시에 조정하여 (P1)의 두 번째 제약조건의 등식이 만족될 때까지 P_{Tx} 를 더욱 줄일 수 있기 때문이다. 여기서는 $E_{Tx} = \tau P_{Tx}$ 로 정의함으로써 (P1-I)문제를 등가적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(P1-II) \quad \minimize_{\mathbf{Q}_v, E_{Tx}, \tau} \quad \tau E_{Tx}$$

subject to $f(E_{Tx}, \tau) \geq R_{\min}$,

for $k = 1, \dots, K$, $0 \leq \tau \leq 1$,

$$tr(\mathbf{Q}_v) = 1, \mathbf{Q}_v \geq 0, E_{Tx} \leq \tau P_{\max}.$$

여기서 $f(E_{Tx}, \tau)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$f(E_{Tx}, \tau) = \frac{1-\tau}{K} \log_2 \left(1 + \frac{K E_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k \|\mathbf{h}_k\|^2}{(1-\tau)\sigma_n^2} \right)$$

문제 (P1 - I)는 여전히 Non-convex이지만, 만약 τ 가 고정된 상수라면, 문제 (P1-II)은 송신전력을 최소화 하기 위한 송신에너지 공분산 설계 문제가 되며 이는 Second order cone programming (SOCP)로 풀 수 있다. 따라서 $\tau \in (0, 1)$ 구간에 균일한 격자점을 만들어서 각 격자점에 대하여 (P1-II)문제를 최적화 할 수 있다. 즉 고정된 $\bar{\tau}$ 에 대해 다음 최적화 문제를 풀면 된다.

$$(P1-III) \quad \minimize_{\mathbf{Q}_v, E_{Tx}} \quad \bar{\tau} E_{Tx}$$

subject to $f(E_{Tx}, \bar{\tau}) \geq R_{\min}$,

for $k = 1, \dots, K$, $tr(\mathbf{Q}_v) = 1, \mathbf{Q}_v \geq 0$,

$$E_{Tx} \leq \bar{\tau} P_{\max}.$$

(P1-III)의 문제를 격자에 대해 풀었으므로, 최종적으로 각각의 격자에 대해 $\bar{\tau} E_{Tx}$ 를 비교하여 최소가 되는 점에 해당하는 parameter들이 최적화가 된다.

3.2 SDMA기반 에너지 최소화

센서 노드들이 SDMA 방식을 통해 다중접속을 취할 경우, 수식 (3)과 같이 시간적으로 여러 노드들이 데이터 신호를 동시에 AP에 보내기 때문에 노드들 간의 신호가 간섭을 일으키게 된다. 즉, k번째 노드의 수신 SINR은 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_{k, SDMA} = \frac{p_k |\mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k|^2}{\mathbf{w}_k^H \left(\sum_{j \neq k} p_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_M \right) \mathbf{w}_k} \quad (7)$$

SDMA방식은 TDMA방식과 달리 데이터를 $(1-\tau)$ 구간동안 전송하므로, k번째 노드 전송률 (bps/Hz)은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{k, SDMA} = (1-\tau) \log_2 (1 + \gamma_{k, SDMA}), \quad (8)$$

따라서, SDMA기반 에너지 최소화 문제는 다음과 같은 최적화 문제를 세울 수 있다.

$$(P2) \quad \minimize_{\mathbf{Q}_v, \mathbf{w}_k, P_{Tx}, \tau} \quad \tau P_{Tx}$$

subject to

$$R_{k, SDMA} \geq R_{\min},$$

$$p_k \leq \frac{\tau P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k}{1-\tau} \text{ for } k = 1, \dots, K$$

$$0 \leq \tau \leq 1,$$

$$tr(\mathbf{Q}_v) = 1, \mathbf{Q}_v \geq 0, P_{Tx} \leq P_{\max}.$$

(P2) 역시 Non-convex이며, 또한 k번째 SINR을 최적화하는 과정에서 k번째 노드의 정보 수신 빔포밍 벡터뿐만 아니라 다른 노드들의 정보 수신 빔포밍 벡터의 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는 (P2)를 최적화를 풀기 위해 iterative 접근 방식을 제안한다.

먼저, TDMA와 유사하게 최적화 문제를 간단히 하기 위해 $\tau \in (0, 1)$ 구간에 균일한 격자점을 만들어서 각 격자점에 대하여 최적화 문제를 고려한다. 즉, (P2)는 고정된 $\bar{\tau}$ 에 대해 다음과 같은 최적화 문제를 세울 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{(P2-I)} \quad & \min_{\mathbf{Q}_v, \mathbf{w}_k, P_{Tx}} \bar{\tau} P_{Tx} \\
 & \text{subject to} \\
 & R_{k,SDMA} \geq R_{\min}, \\
 p_k \leq & \frac{\bar{\tau} P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k}{1 - \bar{\tau}} \text{ for } k = 1, \dots, K \\
 \text{tr}(\mathbf{Q}_v) = & 1, \mathbf{Q}_v \geq 0, P_{Tx} \leq P_{\max}.
 \end{aligned}$$

이때 (P2-I)의 첫 번째 제약 조건에서 수식 (7)와 (8)을 대입하면, 다음과 같은 Lemma를 얻을 수 있다.

Lemma 1. (P2-I)의 최적화 문제가 feasible하다면, 최적해의 조건은 모든 노드에 대해 다음을 만족하여야 한다.

$$R_{k,SDMA} = (1 - \bar{\tau}) \log_2(1 + \gamma_{k,SDMA}) = R_{\min} \text{ for } k = 1, \dots, K \quad (9)$$

증명) 최적화 문제가 feasible하다면, 최적해는 (9) 조건을 만족하지 않는다고 가정하자. 다시 말해, k' 번째 노드가 다른 노드들의 전송속도보다 높다고 가정하자. ($R_{k',SDMA} > R_{k,SDMA} (= R_{\min})$, for $k' \neq k$) 그러면 k' 번째 노드에 대해 (P2-I)의 첫 번째 제약조건의 경계까지 k' 번째 노드의 송신 전력을 낮출 수 있으며, 이는 수식 (7)에서 다른 노드들에 간섭을 줄임으로써 $\gamma_{k,SDMA}$ 가 증가되는 효과가 생기며, 이로 인해 k 번째 노드의 송신 전력 역시 낮출 수 있게 된다. 결과적으로 (P2-I)의 두 번째 제약조건으로부터 더 낮은 P_{Tx} 최적해를 찾을 수 있으며 (9)을 만족하지 않는 최적해는 더 이상 최적해가 아니므로 모순이 된다. 따라서 최적해는 (9)을 만족하여야 한다. ■

Lemma 1로부터 최적 해는 수식 (9)을 만족하며, 수식 (9)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{p_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k}{\mathbf{w}_k^H (\sum_{j \neq k} p_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_M) \mathbf{w}_k} = \bar{C}, \quad (10)$$

여기서 $\bar{C} = 2^{\frac{R_{\min}}{1-\bar{\tau}}} - 1$ 로 주어진다. 즉, p_k 를 최소화하기 위해서는 \mathbf{w}_k 의 최적해는 행렬

$(\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H, \sum_{j \neq k} p_j \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_M)$ 의 가장 큰 Generalized eigenvalue ($\equiv \lambda_{1,k}$)에 해당하는 generalized eigenvector로 주어져야한다. 이때, p_k 는 $p_k = \frac{\bar{C}}{\lambda_{1,k}}$ 로 주어진다. 하지만, \mathbf{w}_k 를 구하는 과정에서 서로 다른 노드의 p_k 에 영향을 받으므로, \mathbf{w}_k 는 iteration을 통해 구하여야 한다.

GEVD기반의 최적 해 \mathbf{w}_k 와 \bar{p}_k 가 결정되면, 최적화 문제 (P2-I)는 다음과 같은 문제로 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{(P2-II)} \quad & \min_{\mathbf{Q}_v, P_{Tx}} \bar{\tau} P_{Tx} \\
 & \text{subject to} \\
 \bar{p}_k \leq & \frac{\bar{\tau} P_{Tx} \mathbf{h}_k^H \mathbf{Q}_v \mathbf{h}_k}{1 - \bar{\tau}} \text{ for } k = 1, \dots, K \\
 \text{tr}(\mathbf{Q}_v) = & 1, \mathbf{Q}_v \geq 0, P_{Tx} \leq P_{\max}.
 \end{aligned}$$

(P2-II) 역시 잘 알려진 Second Order Cone Programming (SOCP) 등의 최적화 tool을 통해 최적해를 구할 수 있다.

Remark. 앞 절에서 살펴본 에너지 최소화를 위한 최적해를 구하는 과정에서 TDMA 및 SDMA 경우 모두 Convex programming 통한 최적해를 구하는 과정이 필요하다. 하지만 Convex programming에 대한 정확한 계산 복잡도는 초기값 조건 및 제약 조건에 따라 달라지므로 정확한 계산 복잡도를 나타내기 어렵다. 대신, 정성적인 복잡도를 정리하면 각각 3.1절의 TDMA 경우와 3.2절의 SDMA의 경우 모두 \mathbf{Q}_v, P_{Tx} 를 최적화 하기 위해 Convex programming을 수행하여야한다. 대신, TDMA와 달리 SDMA의 경우 p_k 와 \mathbf{w}_k 를 최적화하기 위한 추가적인 iteration 과정이 필요하므로 SDMA 기반의 계산 복잡도가 TDMA 경우에 비해 높다. 이는 TDMA의 경우 time slot을 나눠서 간섭을 제거한 반면, SDMA의 경우 p_k 와 \mathbf{w}_k 를 통해 간섭들을 조절해야하는 과정이 필요하기 때문에 이로 인한 계산 복잡도가 늘어나게 된다.

IV. 모의실험 결과

WPSN에서의 제안한 알고리즘을 검증하기 위해

그림3에서 노드의 개수에 따른 전체 요구 에너지를 비교하였다. 이때 AP에서의 안테나 개수는 12개로 고정하였으며, 각 노드에서 요구되는 최소 전송 속도는 $R_{min} = 1bps/Hz$ 로 설정하였고, 정보 전송 구간에 대해 TDMA를 이용할 경우와 SDMA를 이용할 경우를 비교하였다. 추가적으로, TDMA를 쓰면서 DL구간(τ)을 0.25로 고정시켰을 때 성능 역시 구하였다. (P1-II)와 (P2-II)문제를 풀기위해 CVX tool^[9]을 이용하였다.

그림 2에서, 노드의 개수가 증가함에 따라, 요구 에너지가 증가함을 알 수 있었으며, DL구간(τ)을 0.25로 고정 시키는 것보다 제한한 알고리즘을 통해 DL구간(τ)과 송신 에너지 신호의 공분산행렬을 동시에 최적화시킬 때 더 적은 에너지가 요구되고, TDMA보다 SDMA기법을 쓸 때 더 적은 에너지가 요구됨을 알 수 있다. 이는 TDMA의 경우 K개의 센서노드들이 UL구간을 K개로 나누어서 쓰기 때문에, 각 센서노드들의 정보 전송 시간이 K에 반비례해서 줄어들게 된다. 반면, SDMA의 경우 UL구간을 동시에 쓰므로, (P2-II) 최적화 문제를 풀으로써 간섭을 최소화하는 \overline{w}_k 를 구한다면, SDMA환경에서 TDMA에 비해 전송 시간이 길어지게 되므로 더욱 효율적인 전송이 가능하다. 따라서 SDMA가 TDMA보다 요구 에너지가 더 적게 된다.

그림 3은 노드의 수를 4개로 고정하였고 AP안테나의 개수에 따른 전체 요구되는 에너지를 구하였다. 그래프에서 알 수 있듯이, 안테나의 개수가 증가할수록 요구되는 에너지가 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 안테나의 개수가 증가할수록 원하는 방향으로 빔을 예리하게 형성시킬 수 있어, 에너지가 효율적으로 전달될 수 있음을 의미한다.

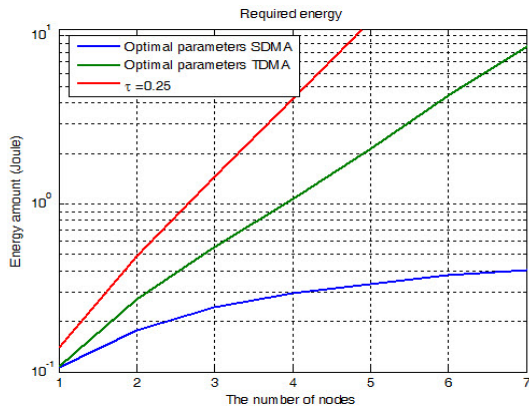


Fig. 2. Total energy versus the number of nodes

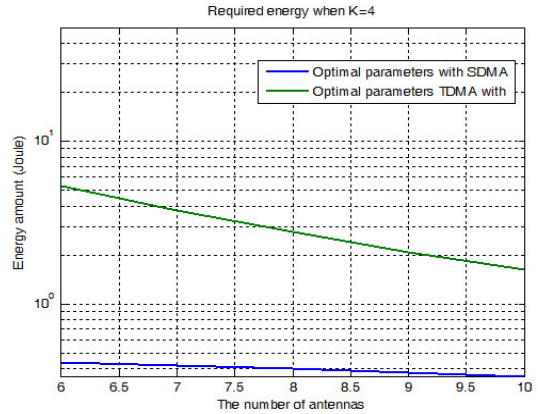


Fig. 3. Total energy versus the number of antennas at AP

V. 결론

본 논문에서는 WPSN에서 TDMA 및 SDMA의 노드 접속방식을 취할 때, 정보 전송에 요구되는 무선 전송 에너지를 최소화 하는 알고리즘을 제안하였다. 즉, 총 송신에너지를 최소화하기 위해서 AP에서 전송 에너지 신호의 UL/DL 시간구간 할당, 송신신호의 공분산행렬을 센서 노드의 데이터 전송속도 제약 하에서 동시에 최적화 하였다. 이와 관련된 에너지 최소화 문제는 non-convex 이기 때문에 UL/DL 시간구간할당을 격자로 나눈 뒤 각각의 격자포인트에 대해 시간구간을 고정시켜 최적화 문제를 SOCP를 통해 해결하였다. 모의실험을 통해 SDMA를 쓸 경우 TDMA에 비해 더 낮은 에너지가 요구되지만, 계산복잡도가 증가함을 확인하였다. 또한, 노드의 수가 증가함에 따라 필요한 총 에너지가 증가하지만, AP안테나 개수를 증가시킴으로써 빔포밍 및 UL/DL시간 동시 최적화를 통해 요구에너지를 줄일 수 있음을 보였다. 본 논문에서는 Single AP환경을 고려하였다. 이를 다중 AP환경으로 확장할 경우, 인접한 AP에서의 간섭이 전송속도와 에너지 채집량에 영향을 주기 때문에 복잡한 간섭 관리 알고리즘을 제시할 수 있을 것으로 예상하며, 이를 앞으로의 연구주제로 남겨둔다.

References

- [1] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, May 2013.

- [2] J. Park and B. Clerckx, "Joint wireless information and energy transfer in a two-user MIMO interference channel," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 4210-4221, Aug. 2015.
- [3] M. Kim, W. Lim, J. Bae, J. Park, Y. Park, J. Lee, S. T. Van, D. Kim, K. Lee, K. Hwang, and Y. Yang, "Development of far field RF power harvesting testbed," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, Oct. 2015.
- [4] S. Lee, J. Park, K. Kang, and Y. Park, "Analysis on spectrum utilization strategies in cognitive radio network based on multi-antenna wireless energy transfer," *J. KICS*, vol. 41, no. 5, May 2016.
- [5] J. Park and B. Clerckx, "Joint wireless information and energy transfer with reduced feedback in MIMO interference channel," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 33, no. 8, pp. 1563-1577, Aug. 2015.
- [6] H. Ju and R. Zhang, "Throughput maximization in wireless powered communication networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 418-428, Jan. 2014.
- [7] R. Wang and D. R. Brown, "Throughput maximization in wireless powered communication networks with energy saving," in *Proc. 2014 48th Asilomar Conf. Sign., Syst. and Comput.*, pp. 516-520, Nov. 2014.
- [8] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chuz, "Multi-antenna wireless powered communication with energy beamforming," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 12, pp. 4349-4361, Dec. 2014.
- [9] M. Grant and S. Boyd, *CVX: Matlab software for disciplined convex programming*, version 1.21, <http://cvxr.com/cvx>, Feb. 2011.

이 성 복 (Sung-bok Lee)



2016년 2월 : 부경대학교 전자공학과 졸업
2016년 3월~현재 : 부경대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 통신공학, OFDM, 인지무선기술

이 종 혁 (Jonghyeok Lee)



2011년 3월~현재 : 부경대학교 전자공학과 학사과정
<관심분야> 통신공학, 사물인터넷, 인지무선기술

박 재 현 (Jaehyun Park)



2003년 2월 : KAIST 전기 및 전자 공학과 학사
2010년 2월 : KAIST 전기 및 전자 공학과 박사
2010년~2013년: 한국전자통신 연구원, 선임연구원
2013년~2014년: Imperial College

London, Research Associate

2014년~현재 : 부경대학교 조교수

<관심분야> 다중안테나 기반 통신 신호처리, 동시 전력 및 정보 전송 기술, 인지무선기술