

인지 라디오 네트워크에서 에너지 하베스팅을 고려한 에너지 효율적 자원 할당 방안

이기송¹ · 이웅섭^{2*}

Energy Efficient Resource Allocation with Energy Harvesting in Cognitive Radio Networks

Kisong Lee¹ · Woongsup Lee^{2*}

¹Department of Information and Telecommunication Engineering, Kunsan National University, Gunsan 54150, Korea

^{2*}Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

요 약

무선신호로부터 전력을 수집하는 에너지 하베스팅 기술은 센서의 전원 부족 문제를 해결하고, 무선네트워크의 수명을 향상시킬 수 있는 방안으로 최근 큰 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 최적화 기법을 이용하여 에너지 하베스팅이 가능한 인지 라디오 네트워크에서 제 2 사용자의 에너지 효율성을 최대화하기 위한 센싱 시간 및 파워 할당 해를 도출하고, 이를 이용하여 반복 기반의 자원 할당 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안 방안이 최적의 에너지 효율을 달성함을 보이고, 기존방안(Max rate scheme)과의 비교를 통해 제안 방안의 우수성을 보인다.

ABSTRACT

Recently, the energy harvesting technology in which energy is collected from the wireless signal which is transmitted by mobile communication devices, has been considered as a novel way to improve the life time of wireless sensors by mitigating the lack of power supply problem. In this paper, we consider the optimal sensing time and power allocation problem for cognitive radio systems, where the energy efficiency of secondary user is maximized while the constraint are satisfied, using the optimization technique. Based on the derived optimal solutions, we also have proposed an iterative resource allocation algorithm in which the optimal power and sensing time allocation can be found without excessive computations. The simulation results confirm that the proposed scheme achieves the optimal performance and it outperforms the conventional resource allocation schemes in terms of energy efficiency while the constraints are guaranteed to be satisfied.

키워드 : 에너지 효율성, 에너지 하베스팅, 인지 라디오, 파워 할당

Key word : Energy Efficiency, Energy Harvesting, Cognitive Radio, Power Allocation

Received 07 March 2016, Revised 08 March 2016, Accepted 23 March 2016

* Corresponding Author Woongsup Lee (E-mail: wslee@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9174)

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.7.1255>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 무선센서 네트워크에서는 전원 부족 문제를 해결하여 센서의 수명을 향상시키는 기술에 대한 요구가 커지고 있다[1]. 이에 대한 요구에 맞추어, 기존의 배터리 내부 전력의 효율적인 관리 방안 외에 버려지는 RF 신호로부터 전력을 수집하는 RF 에너지 하베스팅(Energy harvesting) 기술에 대한 관심이 높아지고 있다[2]. 특히 인지 라디오(Cognitive radio) 네트워크의 경우 주파수 사용 우선권을 가지고 있는 기본 사용자(Primary user) 시스템의 주파수 사용 유무를 확인하기 위하여 제2 사용자(Secondary user) 시스템은 스펙트럼 센싱(Spectrum sensing)을 수행한다. 이 경우 제2 사용자 시스템은 스펙트럼 센싱을 수행하면서 동시에 기본 사용자 시스템의 RF 신호로부터 에너지를 획득할 수 있다. 기존의 인지 라디오 네트워크에서는 제2 사용자 시스템의 데이터 전송률을 최대화하기 위한 자원 할당 기법에 대한 연구가 주로 수행되었다[3, 4]. 또한, 최근에는 인지 라디오 네트워크에서 RF 에너지 하베스팅을 고려하여 제2 사용자 시스템의 데이터 전송률을 최대화하는 방안에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다[5, 6]. 하지만 제2 사용자 시스템의 전원 문제를 효율적으로 해결하기 위해서는 RF 에너지 하베스팅뿐만 아니라 에너지 효율성까지 함께 고려한 자원할당 방안에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는, 에너지 하베스팅이 가능한 인지 라디오 네트워크에서 제2 사용자 시스템의 에너지 효율성(Energy efficiency)을 최대화하기 위한 최적의 센싱 시간 및 전송 파워 할당 방안을 찾고자 한다. 먼저, 초기 도식화한 최적화 문제는 분수 형태의 목적 함수를 갖는 non-convex 문제이다. 이 최적화 문제를 해를 구하기 용이한 형태로 만들기 위해, 비선형 분획 프로그래밍(nonlinear fractional programming)을 이용해 목적 함수를 subtract 형태로 변환하였다. 변환된 최적화 문제를 기반으로 최적의 센싱 시간과 전송 파워 할당의 해를 반복적으로 찾는 에너지 효율적 자원 할당 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 전송 파워 할당 시에 제2 사용자 간의 채널 상황과 제2 사용자가 기본 사용자 시스템에 미치는 간섭 채널 상황을 동시에 고려한다. 따라서 각 채널에 할당되는 전송 파워의 양은 제2 사용자 간의 채널 이득에 비례하고, 기본 사용자 시스템에

미치는 간섭 채널 이득에는 반비례하는 특성을 보인다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 PU-Tx(Primary User-Transmitter), PU-Rx(Primary User-Receiver), SU-Tx(Secondary User-Transmitter), SU-Rx(Secondary User-Receiver)가 존재하는 에너지 하베스팅 기반의 인지 라디오 네트워크를 고려한다. 본 논문에서는 셀룰러 기반의 기본사용자 구조를 고려하였고, 제2 사용자는 단말 간 통신과 같이 일대일 통신을 사용하는 통신구조를 고려하였다.

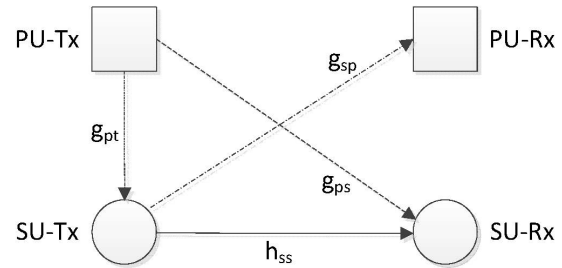


Fig. 1 System model of cognitive radio networks with energy harvesting

SU-Tx는 전체 전송 시간 프레임 T 를 갖으며, 이 중 $\frac{\tau}{T}$ 의 시간 동안 에너지 검출방식을 이용하여 PU-Tx의 주파수 대역 사용 유무를 파악한다. 동시에 PU-Tx로부터 전송되는 RF 신호로부터 에너지 하베스팅을 수행한다. 또한, 나머지 $\frac{T-\tau}{T}$ 의 시간에 SU-Tx는 SU-Rx에 데이터 전송을 수행한다. SU-Tx와 SU-Rx 사이의 무선 채널은 h_{ss} , PU-Tx와 SU-Tx 사이의 무선 채널은 g_{pt} , SU-Tx와 PU-Rx 사이의 무선 채널은 g_{sp} , PU-Tx와 SU-Rx 사이의 무선 채널은 g_{ps} 라 정의한다. 모든 무선 채널은 flat fading 채널이며, SU-Rx가 데이터를 수신할 때 $N_0 \sim CN(0, \sigma^2)$ 의 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이 존재한다고 가정한다[2, 3].

에너지 검출방식(Energy detection)의 검출 확률(detection probability)과 오경보 확률(false alarm probability)은 아래와 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} P_d &= Q\left(\left(\frac{\epsilon}{\sigma^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma + 1}}\right), \\ P_f &= Q\left\{\sqrt{2\gamma + 1} Q^{-1}(P_d) + \sqrt{\tau f_s} \gamma\right\}. \end{aligned} \quad (1)$$

수식 (1)에서 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 로 정의되며, γ 는 PU-Tx와 SU-Tx사이 무선 채널의 SNR(Signal-to-Noise Ratio), ϵ 는 문턱값 (detection threshold), f_s 는 샘플링 주파수이다. 수식 1에서 확인할 수 있듯이 목표 검출 확률을 정하면 그 값에 따라서 오경보 확률이 정해진다.

인지 라디오 네트워크에서 채널이 비어있다고 판단이 되면 SU-Tx는 상대적으로 큰 파워인 p_0 를 이용하여 데이터를 전송한다. 반면 채널이 PU-Tx에 의해 사용되고 있다고 판단되면 상대적으로 작은 파워인 p_1 을 이용하여 데이터를 전송한다. 이는 SU의 전송이 PU의 동작에 최소한의 영향을 미치게 하기 위함이다. 이 때 PU-Tx가 채널을 사용하지 않으며 SU-Tx가 센싱을 제대로 한 경우의 데이터 전송률 r_{00} , PU-Tx가 채널을 사용하지 않으며 SU-Tx가 센싱을 제대로 하지 못한 경우의 데이터 전송률 r_{01} , PU-Tx가 채널을 사용하고 있으며 SU-Tx가 센싱을 제대로 하지 못한 경우의 데이터 전송률 r_{10} , PU-Tx가 채널을 사용하고 있으며 SU-Tx가 센싱을 제대로 한 경우의 데이터 전송률 r_{11} 은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{00} &= \log_2\left(1 + \frac{h_{ss}p_0}{\sigma^2}\right), \\ r_{01} &= \log_2\left(1 + \frac{h_{ss}p_1}{\sigma^2}\right), \\ r_{10} &= \log_2\left(1 + \frac{h_{ss}p_0}{g_{ps}P_p + \sigma^2}\right), \\ r_{11} &= \log_2\left(1 + \frac{h_{ss}p_1}{g_{ps}P_p + \sigma^2}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

또한, SU-Tx의 데이터 전송 시간인 $\frac{T-\tau}{T}$ 동안의 평균 데이터 전송률은 다음과 같다.

$$C(\tau, p_0, p_1) = \frac{T-\tau}{T} E\left\{P(H_0)(1-P_f)r_{00} + P(H_0)P_f r_{01} + P(H_1)(1-P_d)r_{10} + P(H_1)P_d r_{11}\right\}. \quad (3)$$

수식 (3)에서 E는 기댓값(Expectation)을 의미하며, $P(H_0)$ 는 채널이 비어있을 확률, $P(H_1)$ 은 채널이 PU-Tx

에 의해 사용되고 있을 확률이다.

SU-Tx가 $\frac{\tau}{T}$ 의 시간동안 센싱을 하면서 획득할 수 있는 에너지양은 다음과 같다.

$$H = \frac{\tau}{T} E\{P(H_1)\eta P_{P_{pt}}\}. \quad (4)$$

수식 (4)에서 η 는 SU-Tx에서의 에너지 변환 효율이며, P_p 는 PU-Tx의 전송 파워이다.

SU-Tx가 사용하는 평균 전송 파워는 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_T = \frac{T-\tau}{T} E\left\{p_0 P(H_0)(1-P_f) + p_1 P(H_0)P_f + p_0 P(H_1)(1-P_d) + p_1 P(H_1)P_d\right\}. \quad (5)$$

또한, SU-Tx가 소모하는 총 에너지양은 회로단에서 일정하게 소모되는 파워 P_c 와 평균 전송 파워 P_T 의 합에 PU-Tx로부터 획득하는 에너지양 H 를 뺀 값으로 표현할 수 있다. 즉 총 소모 에너지양은 아래의 식과 같이 표현된다.

$$P(\tau, p_0, p_1) = P_c + P_T - H. \quad (6)$$

SU-Tx가 데이터를 전송하는 동안 PU-Rx에 미치는 간섭(Interference)의 크기는 수식 (7)과 같이 표현이 가능하다.

$$Q = \frac{T-\tau}{T} E\{g_{sp}p_0 P(H_1)(1-P_d) + g_{sp}p_1 P(H_1)P_d\}. \quad (7)$$

또한, SU-Tx가 데이터 전송에 얼마나 효율적으로 에너지를 사용했는지를 나타내는 지표인 에너지 효율성은 $C_E = \frac{C(\tau, p_0, p_1)}{P(\tau, p_0, p_1)}$ 로 나타낼 수 있다. C_E 는 단위 에너지 당 데이터 전송률로써, bps/joule의 단위를 갖는다.

III. 에너지 효율적 자원 할당 기법

II장에서 정의한 수식을 기반으로 SU-Tx의 에너지 효율성을 최대화 하는 센싱 시간 τ 와 전송 파워 p_0, p_1 을 찾는 최적화 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\tau, p_0, p_1} \frac{C(\tau, p_0, p_1)}{P(\tau, p_0, p_1)} \\ \text{subject to} & \quad \text{C1: } H \geq H_m, \quad \text{C2: } P_T \leq P_m, \\ & \quad \text{C3: } Q \leq Q_m, \quad \text{C4: } p_0, p_1 \geq 0, \\ & \quad \text{C5: } 0 \leq \tau \leq T. \end{aligned} \quad (8)$$

최적화 문제 (8)에서 제약 조건 C1은 SU-Tx에게 최소한의 획득 에너지양 H_m 을 보장해 주기 위한 것이다. 제약 조건 C2는 SU-Tx의 평균 전송 파워가 허용 전송 파워 P_m 보다 작아야 됴를 나타내고, C3는 SU-Tx가 PU-Rx에 미치는 간섭의 크기가 Q_m 보다 작아야 함을 나타낸다. 최적화 문제 (8)은 p_0 와 p_1 에 대해서는 convex 하지만, τ 에 대해서는 convex 하지 않으므로 최적의 센싱 시간을 closed-form으로 구하기 어렵다. 하지만 τ 의 범위는 0과 T 사이에 존재하므로, exhaustive search를 통해 최적의 τ 를 찾을 수 있다. 또한, 최적화 문제 (8)의 목적 함수는 분수형태이기 때문에 non-convex한 특성을 갖는다. 그러므로 문제를 convex 형태로 만들어 주기 위해서는 목적 함수를 subtract form으로 변환 시켜 주어야 한다. 이를 위해 먼저 $x = \frac{C(\tau, p_0, p_1)}{P(\tau, p_0, p_1)}$ 를 정의한다.

Theorem 1 : 분수 꼴을 갖는 원래의 목적 함수는 변환된 subtract form, $f(\tau, p_0, p_1) = C(\tau, p_0, p_1) - xP(\tau, p_0, p_1)$ 와 동일하며, 최적의 해 x^* 는 다음을 만족한다.

$$\begin{aligned} & \max_{p_0, p_1} C(\tau, p_0, p_1) - x^* P(\tau, p_0, p_1) \\ & = C(\tau, p_0^*, p_1^*) - x^* P(\tau, p_0^*, p_1^*) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $C(\tau, p_0, p_1) \geq 0, P(\tau, p_0, p_1) > 0$ 을 만족한다. 또한, 반복적 방안을 이용해 얻은 x 는 최적 해에 접근하며 수렴한다.

Proof : 자세한 증명 과정은 [7, 8]를 참고.

Theorem 1에 의해 최적화 문제 (8)은 주어진 τ 에 대해 아래 문제 (10)과 같이 변환될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{p_0, p_1} f(\tau, p_0, p_1) = C(\tau, p_0, p_1) - xP(\tau, p_0, p_1) \\ \text{subject to} & \quad \text{C1, C2, C3, C4.} \end{aligned} \quad (10)$$

본 연구에서는 최적화 문제 (10)을 기반으로 완벽한 센싱(perfect sensing)이 가능한 환경)에서 p_0 와 p_1 에 대한 해를 찾고자 한다.

이 상황에서 전송 파워 p_0 와 p_1 에 대한 해를 찾기 위해서는, 먼저 다음의 Lagrangian 함수를 구해야 한다.

$$\begin{aligned} A(p_0, p_1, \alpha, \lambda, \beta) &= C(\tau, p_0, p_1) - xP(\tau, p_0, p_1) \\ &+ \alpha(H - H_m) + \lambda(P_m - P_T) + \beta(Q_m - Q). \end{aligned} \quad (11)$$

위 식에서 α, λ, β 는 음수가 아닌 Lagrangian 계수이다. 파워 할당 해는 수식 (11)을 각각 p_0 와 p_1 에 대해서 미분을 하여 찾은 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 조건으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_0 = \left[\frac{1}{(\log 2)(x + \lambda)} - \frac{\sigma^2}{h_{ss}} \right]^+, \quad (12)$$

$$p_1 = \left[\frac{1}{(\log 2)(x + \lambda + \beta g_{sp})} - \frac{g_{ps} P_P + \sigma^2}{h_{ss}} \right]^+. \quad (13)$$

위 식에서 $[x]^+ = \max(0, x)$ 이며, 파워 할당의 의미는 다음과 같다. p_0 와 p_1 은 water-filling 파워 할당과 유사한 형태를 갖는다. 그러므로 할당되는 파워의 양은 SU-Tx와 SU-Rx 사이의 채널 상황에 영향을 많이 받는다. 예를 들어, h_{ss} 의 채널 환경이 좋고, PU-Tx로부터 오는 간섭의 크기가 작을수록 채널에 더 많은 양의 파워를 할당한다. 또한, p_1 의 경우 SU-Tx와 PU-Rx 사이의 채널 g_{sp} 의 값이 클수록, PU-Rx에 미치는 간섭의 양을 줄여주기 위해서 채널에 할당되는 파워의 양을 줄이는 경향이 있다. 수식 (12)와 (13)를 통해서 알 수 있듯이 p_0 가 p_1 보다 큰 값을 갖는다.

할당된 파워 p_0 와 p_1 을 기준으로, Lagrangian 계수는 양분 (bisection) 기법 혹은 기울기 (gradient) 알고리즘을 통해 업데이트 될 수 있다.

제안하는 파워 할당 기법의 동작은 알고리즘 1에 정리되어 있다. 먼저, SU-Tx는 x, p_0, p_1, δ 를 초기화 한 후,

$x = \frac{C(\tau, p_0, p_1)}{P(\tau, p_0, p_1)}$ 를 결정한다. 그 후 수식 (12)와 (13)에 따

라 p_0 와 p_1 이 수렴할 때까지 그 값을 찾는다. 수렴한 p_0 와 p_1 을 이용하여 다시 x 를 업데이트 하고, 위의 과정을

1) 완벽한 센싱이 가능한 환경에서는 100% 확률의 detection probability와 0%의 false alarm probability ($P_d = 1, P_f = 0$)를 가지게 된다.

다음의 조건 $|C(\tau, p_0, p_1) - xP(\tau, p_0, p_1)| < \delta$ 이 만족할 때까지 계속한다.

Algorithm 1 Proposed Scheme

```

01: for  $\tau = 1 : T$ 
02:   Set  $x, p_0, p_1$ , and  $\delta$ 
03:   repeat
04:     Set  $x = C(\tau, p_0, p_1) / P(\tau, p_0, p_1)$ 
05:     repeat
06:       Find  $p_0$  and  $p_1$  according to (12) and (13)
07:       Update Lagrangian multipliers
08:     until  $p_0$  and  $p_1$  converge
09:     Update  $C(\tau, p_0, p_1)$  and  $P(\tau, p_0, p_1)$ 
10:   until  $|C(\tau, p_0, p_1) - xP(\tau, p_0, p_1)| < \delta$ 
11: end for
    
```

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서는 $\eta = 0.25$ [9], $T = 10\text{ms}$, $P(H_0) = 0.9$, $\text{Target } P_d = 0.9$, $\sigma^2 = 1$ [2, 3], $BW = 10\text{MHz}$, $f_s = 10\text{MHz}$, $\gamma = -10\text{dB}$, $P_p = 43\text{dBm}$, $P_c = 39\text{dBm}$ [10], $H_m = -30\text{dBm}$, $Q_m = -3\text{dBm}$ 로 가정하였다. 또한 채널은 평균 1을 갖는 지수분포 랜덤변수를 이용하여 생성하였다[2, 3]. 성능분석은 Matlab을 이용한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 이루어졌고, 다음에 정의된 3가지 방안들에 대하여 성능을 비교하였다. 각 제안 방안마다 최적의 τ 를 찾고, 이 값을 기준으로 전송 파워를 할당하였다.

- Proposed scheme : 본 논문에서 제안한 기법.
- Exhaustive search : τ, p_0, p_1 의 모든 가능한 조합에 대해서 C_E 를 계산하고, 그 값을 비교하여 제약 조건 C1-C5를 만족시키는 값 중 에너지 효율이 최대가 되는 점을 찾는 기법.
- Max rate scheme : 제약 조건 C1-C5를 만족시키면서 데이터 전송률을 최대화하는 기법. 최적화 문제 (8)의 목적함수를 데이터 전송률로 수정하여 찾을 수 있음.

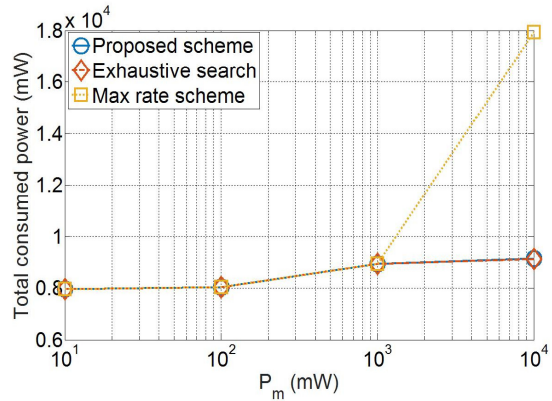


Fig. 2 Total consumed power vs. Available transmission power

그림 2는 허용 전송 파워 P_m 에 대해 SU-Tx에서 총 소모되는 파워를 보여준다. Proposed scheme의 경우 P_m 이 늘어나더라도 총 소모되는 파워는 일정 값 이상 늘어나지 않는다. 그 이유는 최적 값 이상의 전송 파워를 사용하는 것은 오히려 에너지 효율성을 떨어뜨릴 수 있기 때문에 1W 이상의 전송 파워를 사용하지 않는다. 반면, max rate scheme의 경우 데이터 전송률을 최대화하기 위해 항상 허용된 전송 파워를 모두 사용한다.

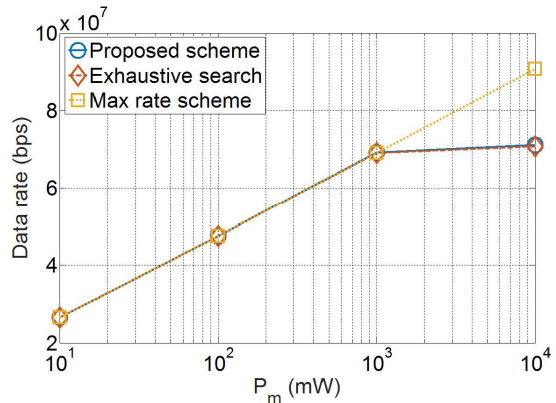


Fig. 3 Data rate vs. Available transmission power

그림 3은 허용 전송 파워 P_m 에 대한 데이터 전송률을 보여준다. 그림 2의 결과에서 확인 했듯이 proposed scheme은 1W 이상의 전송 파워를 사용하지 않으므로 데이터 전송률도 $P_m \geq 1\text{W}$ 일 때 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 반면 max rate scheme의 경우 데이

터 전송률은 허용 전송 파워와 비례하여 증가한다.

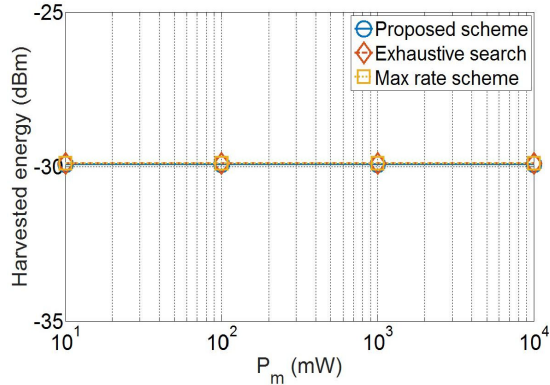


Fig. 4 Harvested energy vs. Available transmission power

그림 4는 허용 전송 파워 P_m 에 대한 에너지 획득량을 보여준다. 세 방안 모두 최소한의 획득 에너지 $H_m = 30dBm$ 을 타이트하게 보장해 주는 것을 볼 수 있다. 이는 SU-Tx가 에너지 획득에 소요되는 시간 $\frac{\tau}{T}$ 를 최소한으로 하고, 나머지 시간 동안 데이터를 전송하는 것이 에너지 효율성 및 데이터 전송률 최대화 측면에서 최적임을 의미한다.

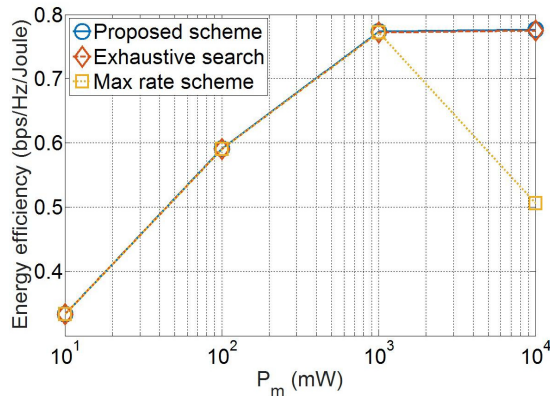


Fig. 5 Sum capacity vs. Available transmission power

그림 5는 허용 전송 파워 P_m 에 대한 에너지 효율성을 보여준다. Proposed scheme의 경우 에너지 효율성 측면에서 1W 이상의 전송 파워를 사용하지 않으므로, 에너지 효율성이 최적의 값으로 수렴한다. 반면, max

rate scheme의 경우 항상 최대의 전송 파워를 사용하기 때문에 이로 인해 얻는 데이터 전송률 증가 이득보다 파워 소모량에서의 손해가 더 커져서, 1W 이상의 전송 파워를 사용하는 구간에서는 에너지 효율성이 떨어짐을 확인할 수 있다. 또한, proposed scheme은 exhaustive search로 찾은 최적의 해와 동일한 성능을 보임을 알 수 있다. 이를 통해서 제안 방안의 최적성을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 에너지 하베스팅이 가능한 인지 라디오 네트워크에서 에너지 효율성을 향상시키기 위한 최적의 자원 할당 방안을 제안하였다. 비선형 분획 프로그래밍과 최적화 기법을 이용하여 에너지 효율성을 최대화 할 수 있는 SU-Tx의 센싱 시간 및 파워 할당 해를 찾았다. 수학적 분석과 시뮬레이션을 통하여 제안 방안이 기존의 데이터 전송률을 최대화하는 방안에 비해 에너지 효율성을 향상시켜 단위 에너지 당 데이터 전송률을 높일 수 있음을 확인하였다. 또한, 제안 방안은 exhaustive search로 찾은 최적의 성능과 일치함을 확인하였다. 본 연구에서는 기본사용자와 제 2사용자가 각각 한 쌍만 존재하는 환경을 고려하였으나, 추후 다중 사용자가 존재하는 환경에서의 성능분석을 진행할 계획이다. 또한 채널측정오차가 존재하는 환경에서의 성능분석도 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (2015R1C1A1A01051747) and this work (2014-04-004) was supported by the Fund for New Professor research foundation Program, Gyeongsang National University, 2014.

REFERENCES

[1] Study on enhancements for MTC, 3GPP TR Std. TR 22.888, v.0.4.0, 2011.

[2] M. Pinuela, P. Mitcheson, and S. Lucyszyn, "Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 61, no. 7, pp. 2715-2726, July 2013.

[3] X. Kang, Y.-C. Liang, H. K. Garg, and L. Zhang, "Sensing-based spectrum sharing in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 4649-4654, Oct. 2009.

[4] S. Stotas and A. Nallanathan, "Optimal sensing time and power allocation in multiband cognitive radio networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 1, pp. 226235, Jan. 2011.

[5] S. Lee, R. Zhang, and K. Huang, "Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 9, pp. 4788-4799, Sep. 2013.

[6] D. T. Hoang, D. Niyato, P. Wang, D.I. Kim, "Opportunistic channel access and RF energy harvesting in cognitive radio networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 32, no. 11, pp. 2039-2052, Nov. 2014.

[7] W. Dinkelbach, "On Nonlinear Fractional Programming," *Management Science*, vol. 13, no. 7, pp. 492-498, Mar. 1967.

[8] D. W. K. Ng, E. Lo, and R. Schober, "Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, pp. 3292 - 3304, Sep. 2012.

[9] C. Mikeka and H. Arai, "Design of a cellular energy-harvesting radio," *Proc. 2009 European Wireless Tech. Conf.*, pp 73-75, Sep. 2009.

[10] M. Deruyck, W. Vereecken, W. Joseph, B. Lannoo, M. Pickavet, and L. Martens, "Reducing the power consumption in wireless access networks: Overview and recommendations," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 132, pp. 255-274, Oct. 2012.



이기송(Kisong Lee)

2009년 KAIST 전기및전자공학과 석사
 2013년 KAIST 전기및전자공학과 박사
 2013년 ~ 2015년 ETRI 융합기술연구소 연구원
 2015년 ~ 현재 국립군산대학교 정보통신공학과 조교수
 ※관심분야 : Energy Harvesting Networks, Wireless Power Transfer, Self-Organizing Networks 등



이용섭(Woongsup Lee)

2006년 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사
 2011년 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사
 2014년 3월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
 ※관심분야 : 차세대 이동통신 시스템, 인지 라디오 시스템, 스마트 그리드 등