

특집논문 (Special Paper)

방송공학회논문지 제20권 제2호, 2015년 3월 (JBE Vol. 20, No. 2, March 2015)

<http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2015.20.2.215>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

## 무선 인지 중계 네트워크에서 이차 사용자의 중계기가 에너지 하베스팅을 사용할 때 처리량을 최대화하기 위한 최적의 하베스팅 시간 분배 방법

임 경 래<sup>a)†</sup>, 이 재 홍<sup>a)</sup>

### Optimal Harvesting Time Allocation Scheme for Maximizing Throughput in Wireless Cognitive Relay Network with Secondary Energy Harvesting Relay

Gyeongrae Im<sup>a)†</sup> and Jae Hong Lee<sup>a)</sup>

#### 요 약

에너지 하베스팅 기술은 에너지가 제약적인 환경에 있는 통신 기기가 정보 송신에 필요한 에너지를 얻는 충전 기술이다. 최근에 제안된 에너지 하베스팅 기술은 주변의 무선 고주파 신호로부터 에너지를 저장한다. 대표적으로 시간 전환 (time switching, TS) 과 전력 분할 (power splitting, PS) 의 기술이 있다. 본 논문은 무선 인지 중계 네트워크에서 이차 사용자의 중계기가 정보 전송을 위해 에너지 하베스팅 기술을 사용할 때 최적의 에너지 하베스팅 시간을 분배하는 방법을 제안한다. 이차 사용자의 중계기는 시간 전환 기술을 사용하여 이차 사용자의 송신기에서 보낸 신호로부터 정보와 에너지를 전달받는다. 이차 사용자의 순시적 처리량을 최대화 하기 위하여 이차 사용자 중계기의 하베스팅 시간을 최적화 한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 고정된 하베스팅 시간을 사용하는 방식보다 본 논문에서 제안한 방법으로 구한 최적의 하베스팅 시간을 사용하는 것이 더 큰 순시적 처리량을 얻음을 확인하였다.

#### Abstract

Energy harvesting technique is an energy charging technique for communication device in energy-constrained environment. Recently, energy harvesting technique that harvests energy from wireless radio frequency signal is proposed. Representatively, there are time switching technique and power splitting technique. This paper proposes an optimal harvesting time allocation scheme in a wireless cognitive relay network when secondary user relay uses energy harvesting technique to transmit information. Secondary user relay receives information and energy simultaneously from the secondary user source's signal via time switching technique. We aim to maximize the instantaneous throughput by optimizing harvesting time of the secondary user relay. Simulation results show that using optimized harvesting time gets larger instantaneous throughput compared to using constant harvesting time.

Keyword : Energy harvesting, time switching, cognitive radio, amplify-and-forward relaying

## 1. 서론

무선 통신에서 에너지 하베스팅 기술은 에너지를 얻는 것이 제약적인 환경에 있는 통신기기들이 전력선을 이용한 전력 공급 없이 신호 전송에 필요한 에너지를 기기 스스로 얻을 수 있도록 하는 기술이다. 기존에 제안된 에너지 하베스팅 기술은 태양열 또는 풍력과 같은 주변의 자연 환경에서 발생하는 에너지에 의존하였다. 최근에는 수신한 무선 고주파 신호에서 신호 전송에 필요한 에너지를 얻는 *simultaneous wireless information and power transfer (SWIFT)* 가 새로운 에너지 하베스팅 기술로 제안되었다<sup>[1][2]</sup>. [1]과 [2]에 의하면 현재의 통신 회로 기술로는 수신기에서 에너지 하베스팅을 통한 에너지 저장과 정보 수신을 어느 한쪽의 손실 없이 동시에 할 수 없다. 따라서 에너지 하베스팅과 정보 수신은 따로 이루어져야 한다고 주장하였다.

최근 떠오르고 있는 에너지 하베스팅 기술은 대표적으로 시간 전환 기술과 전력 분할 기술로 나뉜다. 시간 전환 기술을 사용하는 기기는 전체 신호 전송 시간의 일부를 에너지를 얻는 데 할당한다. 전력 분할 기술을 사용하는 기기는 수신된 신호 에너지의 일부분을 정보 송신을 위한 에너지로 저장한다.

[3]에서는 중계기가 송신기와 수신기 사이의 통신을 돕는 경우를 고려하였다. 중계기가 송신기가 보낸 신호로부터 에너지를 하베스팅 하여 사용할 때의 성능을 분석하였다. 시간 전환 기술과 전력 분할 기술을 사용하는 두 가지 경우에 대하여 중계기가 증폭 후 전송 방식을 사용할 때의 처리량과 불능 확률에 대하여 분석하였다.

무선 인지 통신은 주어진 주파수 대역을 사용하도록 허

가 받지 않은 이차 사용자가 일차 사용자의 성능을 저해하지 않는 선에서 동일한 주파수 대역을 공유하여 사용하는 통신 방법이다. 대표적으로 *underlay* 방식, *overlay* 방식, *interweave* 방식이 있다. 무선 인지 통신 환경에서 이차 사용자의 중계기가 에너지 하베스팅 기술을 사용할 때의 성능에 대하여 연구된 바 있다<sup>[4]</sup>. [4]에서는 *overlay* 방식을 사용하는 무선 인지 통신 환경에서 이차 사용자의 중계기가 에너지 하베스팅을 하여 송신에 필요한 에너지를 얻고, 이 에너지를 사용하여 신호를 중계할 때 처리량을 최대화하는 방법에 대하여 분석하였다. 이 논문에서는 기기의 회로가 소모하는 에너지, 하베스팅 된 에너지와 송신에 필요한 에너지를 고려하여 최적화 문제가 설계되었고 이를 효율적으로 푸는 알고리즘을 제안하였다.

[5]와 [6]에서는 에너지 하베스팅을 사용하는 기기가 무선 인지 환경에서 사용될 때, 기기가 일차 사용자의 중계기와 이차 사용자의 송신기로 동시에 활용되는 경우의 성능을 분석하였다. 이러한 경우, 기기가 일차 사용자 신호를 중계하게 되면 일차 사용자는 성능 면에서 이득을 얻게 된다. 이 이득으로 인하여 남은 시간을 기회적으로 이차 사용자의 송신에 활용한다. 기기는 일차 사용자의 신호로부터 송신에 필요한 에너지를 얻으며, 동시에 일차 사용자의 신호를 중계한다. 일차 사용자의 신호를 중계할 때에는 고정된 전력선이나 배터리에서 공급된 전력을 이용하지만, 기회적으로 이차 사용자의 송신기로 활용될 때에는 오직 하베스팅 한 에너지만 사용한다. 하지만 아직까지 에너지 하베스팅을 하는 중계기가 포함된 무선 인지 네트워크에서 중계기가 에너지 하베스팅을 하는 최적의 시간을 정하는 방법에 대해서는 연구된 바가 없기 때문에 본 논문에서 다루고자 한다.

본 논문에서 다루는 무선 인지 통신 방식은 *underlay* 방식이다. 일차 사용자의 허가 받은 주파수 대역을 이차 사용자가 동시에 사용한다. 이차 사용자는 이차 사용자 송신기, 이차 사용자 중계기, 이차 사용자 수신기로 구성된다. 이차 사용자의 송신기와 중계기에서 송신하는 신호가 일차 사용자 수신기에서는 간섭으로 작용하게 되는데 일차 사용자의 성능을 보장하기 위하여 이 간섭의 크기는 일정 수준 이하가 되어야 한다. 이차 사용자의 중계기는 송신에 필요한 에너지를 얻기 위하여 시간 전환 기술을 사용한다. 이러한 경

a) 서울대학교 전기·정보공학부, 뉴미디어통신공동연구소(Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ.)

‡ Corresponding Author : 임경래(Gyeongrae Im)

E-mail: imgrae@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-8430

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6497-9081>

※ 이 논문은 2014, 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0017437, 2009-0083495).

※ 위 논문의 연구결과 중 일부는 “2014년도 한국방송공학회 추계학술대회”에서 발표한 바 있음.

· Manuscript received January 13, 2015; revised February 24, 2015; accepted March 4, 2015.

우 이차 사용자의 순시적 처리량을 최대화 할 수 있는 최적의 에너지 하베스팅 시간을 할당하는 방법을 분석하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 시스템 모델과 채널 모델을 설정하였다. 3절에서는 순시적 처리량을 최대화 할 수 있는 최적의 하베스팅 시간에 대하여 분석한다. 4절에서는 분석된 결과를 수치적으로 확인하며 마지막 5절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문은 그림 1 과 같이 하나의 일차 사용자 수신기 (PD), 하나의 이차 사용자 송신기(SS), 하나의 이차 사용자 중계기(SR), 하나의 이차 사용자 수신기(SD)로 구성된 무선 인지 네트워크를 다룬다. [4]에서 제시된 모델과 다른

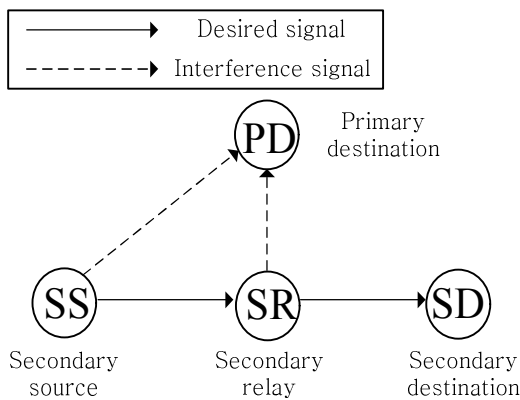


그림 1. 에너지 하베스팅을 하는 이차 사용자의 중계기를 포함하는 시스템 모델

Fig. 1. System model for cognitive relaying network with energy harvesting relay

점은 [4]에서는 overlay 무선 인지 방식을 사용하고 있으나 본 모델은 underlay 무선 인지 방식으로, PD에서의 간섭 제한을 고려해야 한다는 점이다. 각 단말은 하나의 안테나를 가지고 있으며, SS와 SD 사이의 직 경로는 없다고 가정한다. SR는 증폭 후 전송 중계 기법(amplify-and-forward relaying scheme)을 사용하여 신호를 중계한다. 신호 전송은 두 단계의 반 이중 방식(half duplex)을 통해 이루어진다. 전체 신호 전송 시간은 1로 가정한다.

SS와 SR 사이의 채널 계수  $h_{SS-SR}$ , SS와 SD사이의 채널 계수  $h_{SR-SD}$ , SR와 PD 사이의 채널 계수  $h_{SS-PD}$ , SS와 PD 사이의 채널 계수  $h_{SS-PD}$ 는 복소 가우시안 확률 변수이다. 모든 채널은 블록 페이딩 채널로 가정한다. 각 기기에서 채널을 알기 위해서는 피드백 혹은 파일럿을 통하여 채널 정보를 얻어야 한다. 이러한 과정에 소요되는 시간은 전체 신호 전송 시간에 비해 매우 짧기 때문에 무시할 수 있다고 가정한다. 또한 피드백 혹은 파일럿을 통하여 얻어지는 채널 정보는 완벽하며, SS는 모든 채널 정보들을 완벽하게 알고 있다고 가정한다.

SR은 시간 전환 기술을 사용하여 신호 중계에 필요한 에너지를 저장한다. 시간 전환 기술의 블록 선도는 그림 2<sup>[3]</sup>와 같다. 시간 전환 기술은 전체 신호 전송 시간 중 일부 시간을 중계에 필요한 에너지를 저장하기 위하여 할당한다. 처음  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )의 시간 동안 SS에서 SR로 에너지 하베스팅을 위한 신호를 보내게 되고, SR에서는 이 신호가 담고 있는 에너지를 이용하여 에너지를 저장한다. 나머지  $1-\alpha$ 의 시간은 SS에서 SD로 정보 신호 전송을 위해 할당된다.

$\frac{1-\alpha}{2}$ 의 시간은 SS에서 SR로 신호를 보내기 위해 할당되

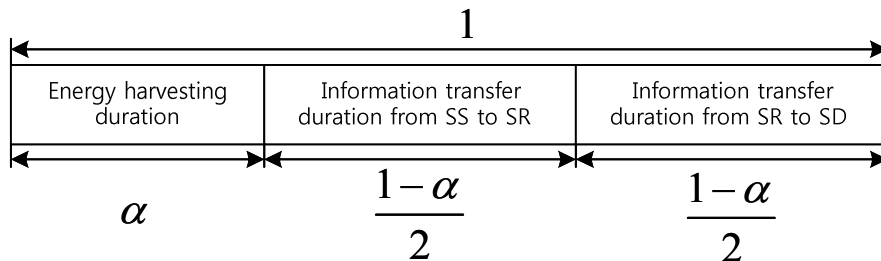


그림 2. 시간 전환 기술 [3]

Fig. 2. Time switching technique [3]

고 나머지  $\frac{1-\alpha}{2}$  의 시간은 에서 저장한 에너지를 사용하여 정보를 증계하기 위해 할당된다.

SS와 SR에서 송신하는 신호는 PD에서 간섭으로 작용하게 된다. 블록 페이딩을 가정하고 있기 때문에 PD에서 수신하게 되는 SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio) 은 간섭의 크기에 따라 달라지게 된다. 이 간섭의 전력이 PD에서 정한 기준으로 정해진 간섭 제한  $\bar{I}$  보다 작아야에서의 SINR이 설정된 기준보다 높을 수 있다. 이 조건을 만족시키지 못하면 일차 사용자의 성능을 보장할 수 없다<sup>[7]</sup>. SS에서 신호 전송에 사용 가능한 최대 전력을  $P_{SS}^{max}$  라고 하자. 간섭 제한을 고려하여 에서 신호 전송에 사용하는

전력을 라고 하면 
$$P_{SS} = \min\left(P_{SS}^{max}, \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2}\right)$$
 이다<sup>[8]</sup>.

$\min(\cdot)$  은 괄호 안의 값들 중 제일 작은 값을 나타내는 함수이다.  $\eta$  를 회로의 에너지 저장 효율이라 하면 SR에서 저장한 총 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$E_h = \eta\alpha(P_{SS} |h_{SS-SR}|^2). \tag{1}$$

SR에서 증계에 사용할 수 있는 최대 전력은 저장한 에너지 (1)을 SR에서 SD로의 정보 증계 시간으로 나눈 값이며,  $P_{SR}^{max}$  로 표시한다.  $P_{SR}^{max}$  은 다음과 같다.

$$P_{SR}^{max} = \frac{E_h}{(1-\alpha)/2} = \frac{2\eta\alpha P_{SS} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha}. \tag{2}$$

SS에서 SR로 정보 신호를 전송할 때 SR이 받게 되는 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_{SR} = h_{SS-SR} \sqrt{P_{SS}} x_{SS} + n_{SR}. \tag{3}$$

$x_{SS}$  는 전달하고자 하는 정보 심볼이며 자체 전력은 1이라 가정한다.  $n_{SR}$  은 복소 가우시안 변수를 따르는 SR에서

의 가산 잡음이며, 분산은  $\sigma_{SR}^2$  이다.

SR은 수신한 신호를 증폭 후 전송하게 된다. 증계기에서 사용할 수 있는 전력을  $P_{SR}$  이라 하면 PD의 간섭 조건을

고려하여 
$$P_{SR} = \min\left(P_{SR}^{max}, \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}\right) = \min\left(\frac{2\eta\alpha P_{SS} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha}, \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}\right)$$

$$= \min\left(\frac{2\eta\alpha \min\left(P_{SS}^{max}, \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2}\right) |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha}, \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}\right)$$
 와 같

이 정해진다. 에서 전송하게 되는 정보 심볼은 증폭 계수를 고려하여 다음과 같이 주어진다<sup>[3]</sup>.

$$x_{SR} = \frac{\sqrt{P_{SR}}}{\sqrt{P_{SS} |h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2}} y_{SR}. \tag{4}$$

SR에서 SD로 정보 신호를 증계할 때 SD에서 수신하게 되는 신호는 다음과 같다.

$$y_{SD} = h_{SR-SD} \frac{\sqrt{P_{SR}}}{\sqrt{P_{SS} |h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2}} (h_{SS-SR} \sqrt{P_{SS}} x_{SS} + n_{SR}) + n_{SD}$$

$$= \frac{\sqrt{P_{SR}}}{\sqrt{P_{SS} |h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2}} h_{SR-SD} h_{SS-SR} \sqrt{P_{SS}} x_{SS} + \frac{\sqrt{P_{SR}}}{\sqrt{P_{SS} |h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2}} h_{SR-SD} n_{SR} + n_{SD}. \tag{5}$$

$n_{SD}$  는 복소 가우시안 변수를 따르는 SD에서의 가산 잡음이며, 분산은  $\sigma_{SD}^2$  이다. SD에서 수신하게 되는 순시적 SNR (signal-to-noise ratio)은 다음과 같다.

$$SNR = \frac{|h_{SR-SD}|^2 |h_{SS-SR}|^2 P_{SS} P_{SR}}{P_{SR} |h_{SR-SD}|^2 \sigma_{SR}^2 + (P_{SS} |h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \sigma_{SD}^2}. \tag{6}$$

### III. 처리량 최대화를 위한 최적의 에너지 하베스팅 시간 할당

이번 장에서는 시스템 모델에서 제안한 신호 전송 방법

을 토대로 SD에서 수신된 신호의 순시적 처리량을 최대화할 수 있는 최적의 에너지 하베스팅 시간을 할당한다.

SD에서 수신한 SNR (6)을 이용하여 유도할 수 있는 순시적 처리량은 다음과 같다.

$$(7) \text{의 순시적 처리량은 } P_{SS} = \min\left(P_{SS}^{\max}, \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2}\right) \text{ 와}$$

$$P_{SR} = \min\left(\frac{2\eta\alpha P_{SS} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha}, \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}\right) \text{ 에 의존적인 값이다.}$$

$(P_{SS}, P_{SR})$  은 조건에 따라 다음과 같이 값을 정할 수 있다.

(8)에서 얻어진  $(P_{SS}, P_{SR})$  을 (7)에 대입하면 순시적 처리량은 (8)의 각 조건에 대하여 서로 다르게 얻어진다. (8)의 4가지 조건에 대하여 순시적 처리량을 구하고, 그 결과를 바탕으로 순시적 처리량을 최대로 하는 최적의 를 구할 수 있다.

$\alpha$  에 대한 초기값이 없으면 (8)의 조건에서 크기 비교가 불가능 하므로 초기값을 중간 값인  $\alpha^* = 0.5$  로 설정하고 (8)에서 조건에 맞는 적합한  $(P_{SS}, P_{SR})$  를 얻는다.  $(P_{SS}, P_{SR})$

를 (7)에 대입하여 순시적 처리량에 대한 식을  $\alpha$  에 대하여 구한 후 처리량을 최대화 하는 최적의  $\alpha$  를 찾는다. 이 때 구해진 값을  $\alpha^*$  로 설정하고 위의 방법을 반복한다. 구해진 가 일정한 값에 수렴할 때까지 반복적으로 탐색한다. (8)의 각 조건에 대하여 최적의  $\alpha$  를 찾는 방법은 다음 A-D의 세부항목에서 다룬다.

$$\text{A. } P_{SS}^{\max} > \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2} \text{ and } \frac{2\eta\alpha\bar{I}|h_{SS-SR}|^2}{(1-\alpha)|h_{SS-PD}|^2} > \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2} \text{의 경우}$$

$$\text{이 경우 } \frac{2\eta\alpha\bar{I}|h_{SS-SR}|^2}{(1-\alpha)|h_{SS-PD}|^2} > \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2} \text{ 는 } \frac{|h_{SS-PD}|^2}{2\eta|h_{SR-PD}|^2|h_{SS-SR}|^2 + |h_{SS-PD}|^2}$$

$< \alpha < 1$  와 같은 부등식 이다.  $(P_{SS}, P_{SR})$  를 (7)에 대입하여 정리하면 순시적 처리량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

(9)에서 log 안의 식은  $\alpha$  에 의존적이지 않다. 그러므로 (9)는  $\alpha$  에 대한 감소 함수이다. 따라서 순시적 처리량을 최대화

$$\text{하기 위한 최적의 선택은 } \alpha = \frac{|h_{SS-PD}|^2}{2\eta|h_{SR-PD}|^2|h_{SS-SR}|^2 + |h_{SS-PD}|^2} \text{ 이다.}$$

$$\text{Throughput} = \frac{1-\alpha}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{|h_{SR-SD}|^2 |h_{SS-SR}|^2 P_{SS} P_{SR}}{P_{SR} |h_{SR-SD}|^2 \sigma_{SR}^2 + (P_{SS} |h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \sigma_{SD}^2} \right]. \quad (7)$$

$$(P_{SS}, P_{SR}) = \begin{cases} \left( \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2}, \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2} \right), & P_{SS}^{\max} > \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2} \text{ and } \frac{2\eta\alpha\bar{I}|h_{SS-SR}|^2}{(1-\alpha)|h_{SS-PD}|^2} > \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}, \\ \left( \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2}, \frac{2\eta\alpha\bar{I}|h_{SS-SR}|^2}{(1-\alpha)|h_{SS-PD}|^2} \right), & P_{SS}^{\max} > \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2} \text{ and } \frac{2\eta\alpha\bar{I}|h_{SS-SR}|^2}{(1-\alpha)|h_{SS-PD}|^2} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}, \\ \left( P_{SS}^{\max}, \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2} \right), & P_{SS}^{\max} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2} \text{ and } \frac{2\eta\alpha P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha} > \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}, \\ \left( P_{SS}^{\max}, \frac{2\eta\alpha P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha} \right), & P_{SS}^{\max} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2} \text{ and } \frac{2\eta\alpha P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}. \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Throughput} = \frac{1-\alpha}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{|h_{SR-SD}|^2 |h_{SS-SR}|^2 \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2} \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}}{\frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2} |h_{SR-SD}|^2 \sigma_{SR}^2 + \left( \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2} |h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2 \right) \sigma_{SD}^2} \right]. \quad (9)$$

$$\text{Throughput} = \frac{1-\alpha}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{2\eta\alpha\bar{I} |h_{SS-SR}|^4 |h_{SR-SD}|^2}{2\eta\alpha |h_{SS-SR}|^2 |h_{SR-SD}|^2 |h_{SS-PD}|^2 \sigma_{SR}^2 + (1-\alpha) |h_{SS-PD}|^2 (|h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \sigma_{SD}^2} \right]. \quad (10)$$

$$\frac{d(\text{Throughput})}{d\alpha} = -\frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{a\alpha}{(b-c)\alpha + c} \right] + \frac{1-\alpha}{2 \ln 2} \frac{1}{(a+b-c)\alpha + c} \frac{ac}{(b-c)\alpha + c}. \quad (12)$$

$$\text{Throughput} = \frac{1-\alpha}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{|h_{SR-SD}|^2 |h_{SS-SR}|^2 P_{SS}^{\max} \bar{I}}{|h_{SR-SD}|^2 \bar{I} \sigma_{SR}^2 + |h_{SR-PD}|^2 (P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \sigma_{SD}^2} \right]. \quad (13)$$

B.  $P_{SS}^{\max} > \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2}$  and  $\frac{2\eta\alpha\bar{I} |h_{SS-SR}|^2}{(1-\alpha) |h_{SS-PD}|^2} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}$  의 경우

이 경우  $\frac{2\eta\alpha\bar{I} |h_{SS-SR}|^2}{(1-\alpha) |h_{SS-PD}|^2} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}$  는  $0 < a \leq \frac{|h_{SS-PD}|^2}{2\eta |h_{SR-PD}|^2 |h_{SS-SR}|^2 + |h_{SS-PD}|^2}$  와 같은 조건이다.  $(P_{SS}, P_{SR})$  를 (7)에 대입하여 정리하면 순시적 처리량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

간단한 치환을 이용하여 (10)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Throughput} = \frac{1-\alpha}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{a\alpha}{b\alpha + c(1-\alpha)} \right]. \quad (11)$$

$a = 2\eta\bar{I} |h_{SS-SR}|^4 |h_{SR-SD}|^2$ ,  $b = 2\eta |h_{SS-SR}|^2 |h_{SR-SD}|^2 |h_{SS-PD}|^2 \sigma_{SR}^2$ ,  $c = |h_{SS-PD}|^2 (|h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \sigma_{SD}^2$  으로 치환하였다. (11)은  $\alpha$ 의 값이 0과 1사이에서 위로 볼록한 연속 함수이다. 따라서 최적의  $\alpha \in (0,1)$ 가 존재한다. (11)의  $\alpha$ 에 대한 일차도함수를 구하면 다음과 같다.

최적의  $\alpha$ 는  $\frac{d(\text{Throughput})}{d\alpha} = 0$ 을  $\alpha \in (0,1)$ 에 대하여 해를 구함으로써 얻어진다. 그러나  $\frac{d(\text{Throughput})}{d\alpha} = 0$ 는 닫힌 형태의 해가 존재하는 식이 아니기 때문에 최적의  $\alpha$ 는

$$\text{Throughput} = \frac{1-\alpha}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{2\eta |h_{SR-SD}|^2 |h_{SS-SR}|^4 P_{SS}^{\max} \alpha}{2\eta P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2 |h_{SR-SD}|^2 \sigma_{SR}^2 \alpha + (1-\alpha) (P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \sigma_{SD}^2} \right]. \quad (14)$$

수치 해석적인 방법을 통하여 구할 수 있다.

C.  $P_{SS}^{\max} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2}$  and  $\frac{2\eta\alpha P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha} > \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}$  의 경우

이 경우  $\frac{2\eta\alpha P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha} > \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}$  는  $\frac{\bar{I}}{(\bar{I} + 2\eta P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2 |h_{SR-PD}|^2)}$   $< a < 1$ 와 같이 쓸 수 있다. 위의 분석과 마찬가지로 조건에 일치하는  $(P_{SS}, P_{SR})$ 를 (7)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 순시적 처리량을 얻을 수 있다.

(13)는 (9)과 마찬가지로 log 안이  $\alpha$ 에 의존적이지 않다. 그러므로  $\alpha$ 에 대한 감소 함수이다. 최적의 선택은  $\alpha = \frac{\bar{I}}{\bar{I} + 2\eta P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2 |h_{SR-PD}|^2}$  이다.

D.  $P_{SS}^{\max} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SS-PD}|^2}$  and  $\frac{2\eta\alpha P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}$  의 경우

이 경우  $\frac{2\eta\alpha P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2}{1-\alpha} \leq \frac{\bar{I}}{|h_{SR-PD}|^2}$  는  $0 < a \leq \frac{\bar{I}}{(\bar{I} + 2\eta P_{SS}^{\max} |h_{SS-SR}|^2 |h_{SR-PD}|^2)}$ 와 같이 쓸 수 있다. 조건에 일치하는  $(P_{SS}, P_{SR})$ 를 (7)에 대입하면 다음을 얻을 수 있다. (14)는 식의 형태가 (10)와 비슷하다. 간단한 치환을 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d(\text{Throughput})}{d\alpha} = -\frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{p\alpha}{(q-r)\alpha+r} \right] + \frac{1-\alpha}{2 \ln 2} \frac{1}{(p+q-r)\alpha+r} \frac{pr}{(q-r)\alpha+r}. \quad (16)$$

$$\text{Throughput} = \frac{1-\alpha}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{p\alpha}{q\alpha+r(1-\alpha)} \right]. \quad (15)$$

$p = 2\eta|h_{\text{SR-SD}}|^2|h_{\text{SS-SR}}|^4 P_{\text{SS}}^{\max 2}$ ,  $q = 2\eta P_{\text{SS}}^{\max} |h_{\text{SS-SR}}|^2 |h_{\text{SR-SD}}|^2 \sigma_{\text{SR}}^2$ ,  $r = (P_{\text{SS}}^{\max} |h_{\text{SS-SR}}|^2 + \sigma_{\text{SR}}^2) \sigma_{\text{SD}}^2$  으로 치환하였다. (15) 또한 (11)과 마찬가지로  $\alpha$ 의 값이 0과 1사이에서 위로 볼록한 연속 함수이며, 따라서 최적의  $\alpha \in (0,1)$ 가 존재한다. (15)를  $\alpha$ 에 대하여 1차 미분 하면 (16)과 같다.

최적의  $\alpha$ 는  $\frac{d(\text{Throughput})}{d\alpha} = 0$ 의 해이다.  $\alpha$ 는 수치 해석적인 방법으로 구할 수 있다.

표 1은 순시적 처리량을 최대화 하기 위한 에너지 하베스팅 시간을 할당하기 위하여 최적의  $\alpha$ 를 구하는 방법을 요약하였다.

표 1. 순시적 처리량을 최대로 하기 위한 최적의 에너지 하베스팅 시간 할당  
Table 1. Optimal energy harvesting time allocation to maximize instantaneous throughput

조건	최적의 $\alpha$
$P_{\text{SS}}^{\max} > \frac{\bar{I}}{ h_{\text{SS-PD}} ^2},$ $\frac{2\eta\alpha\bar{I} h_{\text{SS-SR}} ^2}{(1-\alpha) h_{\text{SS-PD}} ^2} > \frac{\bar{I}}{ h_{\text{SR-PD}} ^2}.$	$\alpha = \frac{ h_{\text{SS-PD}} ^2}{2\eta h_{\text{SR-PD}} ^2 h_{\text{SS-SR}} ^2 +  h_{\text{SS-PD}} ^2}$
$P_{\text{SS}}^{\max} > \frac{\bar{I}}{ h_{\text{SS-PD}} ^2},$ $\frac{2\eta\alpha\bar{I} h_{\text{SS-SR}} ^2}{(1-\alpha) h_{\text{SS-PD}} ^2} \leq \frac{\bar{I}}{ h_{\text{SR-PD}} ^2}$	$\frac{d(\text{Throughput})}{d\alpha} = 0$ 의 해를 수치해석적으로 구함
$P_{\text{SS}}^{\max} \leq \frac{\bar{I}}{ h_{\text{SS-PD}} ^2},$ $\frac{2\eta\alpha P_{\text{SS}}^{\max}  h_{\text{SS-SR}} ^2}{1-\alpha} > \frac{\bar{I}}{ h_{\text{SR-PD}} ^2}$	$\alpha = \frac{\bar{I}}{\bar{I} + 2\eta P_{\text{SS}}^{\max}  h_{\text{SS-SR}} ^2  h_{\text{SR-PD}} ^2}$
$P_{\text{SS}}^{\max} \leq \frac{\bar{I}}{ h_{\text{SS-PD}} ^2},$ $\frac{2\eta\alpha P_{\text{SS}}^{\max}  h_{\text{SS-SR}} ^2}{1-\alpha} \leq \frac{\bar{I}}{ h_{\text{SR-PD}} ^2}$	$\frac{d(\text{Throughput})}{d\alpha} = 0$ 의 해를 수치해석적으로 구함

#### IV. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 SR과 SD에서의 잡음 분산을 0dB로 가정하였다. 하베스팅 회로의 효율을  $\eta$ 를 1로 가정하였다. 3장에서 제안한 방법을 사용하여 구한  $\alpha$ 를 optimal  $\alpha$ 로 표기 하였다. 또한 성능 비교를 위하여  $\alpha$ 를 정해진 값으로 사용하는 경우를 시뮬레이션 하였다. 그림 3, 4에서  $\alpha$ 는 1/8, 1/4, 1/2, 3/4로 두었다. 그림 3에서 간섭 제한  $\bar{I}$ 을 0dB로 두었고, 그림 4에서 의 최대 전송 전력  $P_{\text{SS}}^{\max}$ 을 10dB로 두고 시뮬레이션 하였다.

그림 3은 SS에서 사용할 수 있는 최대 전송 전력과 순시적 처리량의 관계를 나타낸 것이다. 3장에서 제안한 방법으로 구한 최적의  $\alpha$ 를 사용하면 가장 큰 처리량을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.  $\alpha$ 가 1/8과 1/4사이에서 최적의 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고  $\alpha$ 가 1/4 이후 증가할 수록 처리량이 저하되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 에너지 하베스팅에 할당된 시간이 늘어나서 SR에서 신호 중계를 위한 에너지를 많이 충전 할 수 있지만, 정보 신호 전송 시간이 짧아지는 것이 순시적 처리량의 변화에 영향을 더 많이 주기 때문이다. 또한 에서 사용할 수 최대 전송 전력이 늘어남에 비해 처리량이 선형적으로 증가하지 않고 증가율이 감소하는 경향을 보이는데, 이는 PD에서의 간섭 제한 조건 때문이라고 해석할 수 있다.

그림 4는 PD에서의 간섭 제한 조건과 처리량의 관계를 나타낸다. 그림3과 마찬가지로 최적의  $\alpha$ 를 이용하면 가장 큰 처리량을 얻을 수 있다. 또한 PD에서의 간섭 제한 조건이 늘어나면 처리량이 향상되는 것을 알 수 있는데 에서 신호 전송에 더 큰 전력을 사용할 수 있기 때문이다. 또한 그림 3과 마찬가지로 최적의  $\alpha$ 는 1/8과 1/4 사이에서 선택 되는 것을 알 수 있다. 그림 4역시  $\alpha$ 가 1/4 이후 증가할 수록 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다.

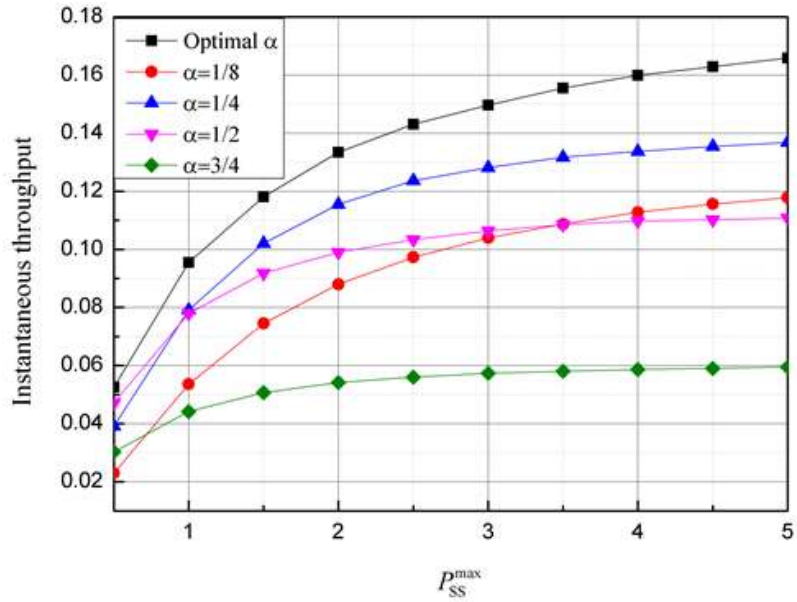


그림 3.  $P_{ss}^{\max}$  와 순시적 처리량의 관계

Fig. 3. Relationship between  $P_{ss}^{\max}$  and instantaneous throughput

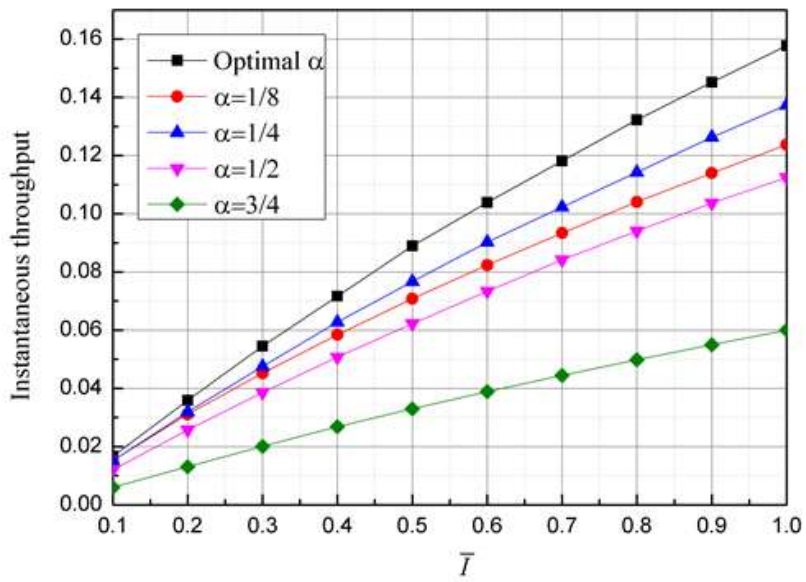


그림 4. 에서의 간섭 제한 조건과 처리량의 관계

Fig. 4. Relationship between interference constraints of PD and throughput



## V. 결론

본 논문에서는 무선 인지 환경에서 이차 사용자의 중계기가 에너지 하베스팅 기술을 사용하여 에너지를 저장하고 이 에너지를 사용하여 신호 중계를 할 때 처리량을 최대화할 수 있는 에너지 하베스팅 시간을 할당하는 방법을 제안하였다. 중계기는 증폭 후 전송 중계 기법을 사용하여 신호를 중계하며, 시간 전환 기술을 사용하여 중계에 필요한 에너지를 저장한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구한 최적의 시간 할당을 사용할 때의 처리량과 고정된 시간 할당을 사용할 때의 처리량을 비교하였으며 성능 향상이 있음을 확인하였다.

## 참고 문헌 (References)

- [1] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in *Proc. IEEE ISIT 2008*, Toronto, Canada, July 2008.
- [2] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer," in *Proc. IEEE Int'l Symp. Inf. Theory*, Jun. 2010, pp. 2363-2367.
- [3] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, July 2013.
- [4] X. Lu, W. Xu, S. Li, J. Lin, and Z. He, "Simultaneous information and power transfer for relaying assisted cognitive radio networks," in *Proc. IEEE ICC 2014*, Sydney, Australia, June 2014.
- [5] Z. Wang, Z. Chen, L. Luo, Z. Hu, B. Xia, and H. Liu, "Outage analysis of cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer," in *Proc. IEEE ICC 2014*, Sydney, Australia, June 2014.
- [6] S. Yin, E. Zhang, Z. Qu, L. Yin, and S. Li, "Optimal cooperation strategy in cognitive radio systems with energy harvesting," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 9, pp. 4693-4707, Sept. 2014.
- [7] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894-914, May 2009.
- [8] T. W. Ban, W. Choi, B. C. Jung, and D. K. Sung, "Multi-user diversity in a spectrum sharing system," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 1, pp. 102-106, Jan. 2009.
- [9] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2012*, Anaheim, CA, Dec. 2012.

## 저 자 소 개



### 임 경 래

- 2013년 : 한국과학기술원(KAIST) 학사 졸업
- 2013년 ~ 현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박통합과정
- ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-6497-9081>
- 주관심분야 : 무선통신, MIMO, 협력통신, V2V



### 이 재 홍

- 1976년 : 서울대학교 전자공학과 학사 졸업
- 1978년 : 서울대학교 전자공학과 석사 졸업
- 1986년 : University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학과 박사 졸업
- 1987년 ~ 현재 : 서울대학교 전기정보공학부 교수
- 주관심분야 : 디지털통신, 부호이론, MIMO, OFDM, 협력통신, V2V