

다중안테나 무선 전력 전송에 기반한 인지 무선 네트워크에서의 스펙트럼 활용방안 분석

이성복*, 박재현^o, 강규민*, 박윤주**

Analysis on Spectrum Utilization Strategies in Cognitive Radio Network Based on Multi-Antenna Wireless Energy Transfer

Sung-bok Lee*, Jaehyun Park^o, Kyu-Min Kang*, Yunju Park**

요 약

이 논문은 다중안테나를 이용한 무선전력전송에 기반한 인지무선(Cognitive Radio,CR) 네트워크에서 스펙트럼 활용방안을 다룬다. 무선 전력전송 기반의 CR 통신 시스템은 스펙트럼 사용효율을 높이기 위해 허가되지 않은 이차사용자(Secondary User,SU)가 기존의 일차 사용자(Primary User,PU)에 의해 사용되지 않는 스펙트럼을 활용하여 전력을 채집하고 정보를 보낼 수 있는 시스템이다. 본 논문에서는 스펙트럼 사용효율을 높이기 위해 이차 기지국이 다중 안테나(Multi-antenna)를 사용하여, PU에 대한 간섭 제거 및 에너지 빔포밍을 할 수 있는 전송기법을 제안하고, 이에 따른 정보전송량을 최대로 얻기 위한 프레임 스케줄링 기법을 제시한다.

Key Words : Energy Beamforming, Cognitive Radio network, Wireless Energy Transfer

ABSTRACT

This paper presents spectrum utilization strategies in cognitive radio (CR) networks powered by multi-antenna based wireless energy transfer. Secondary access point (AP) with multiple antennas should transfer the energy to the secondary sensor nodes with energy beamforming and simultaneously induces no interference to PUs. In addition, sensor nodes can transmit information to the secondary AP using the harvested energy, only when the spectrum is not utilized by PUs. We analyze the achievable rate of the CR sensor networks and propose an interference nulling energy beamforming method to maximize the achievable rate. Finally, we also propose a frame scheduling algorithm in which the durations of wireless energy transfer/information transfer frames (phases) are optimized.

※ 본 연구의 일부는 2014학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행되었으며 (C-D-2014-1265), 일부는 미래창조과학부의 지원(No. 2015 R1C1A1A01051490) 및 미래창조과학부의 지원을 받은 KAIST 부설 한국과학영재학교의 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

♦ 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

* 한국전자통신연구원

** KAIST부설 한국과학영재학교

논문번호 : KICS2015-12-408, Received December 24, 2015; Revised February 19, 2016; Accepted April 11, 2016

I. 서론

최근 스마트폰 등 통신기기의 발달에 따른 무선 데이터 서비스 수요증가로 인하여 제한된 자원인 주파수를 효율적으로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 특히 이러한 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 주 사용자인 일차 네트워크에서 일차 사용자가 사용하지 않는 부분의 주파수 대역을 일차 네트워크에 간섭 영향을 주지 않는 조건으로 이차 사용자에게 통신을 허가하는 인지무선 (Cognitive Radio, CR) 시스템이 많은 주목을 받고 있다.[1-5] 본 논문에서는 이러한 인지무선 네트워크에서 이차 사용자 또는 이차 단말기의 에너지 한계를 극복하기 위하여 이차 단말기는 무선 신호로부터 에너지를 채집할 수 있는 기능을 가지고 있고, 이차 기지국은 이차 단말기에 전력을 전송하여 이차 단말기가 정보를 기지국에 전달하는 시스템을 고려한다. 특히, 본 논문에서는 이차 기지국이 다중 안테나를 사용함으로써 일차 네트워크에 간섭이 주지 않도록 하면서, 전력을 전달할 수 있는 간섭제거 (Interference nulling) 기반 에너지 빔포밍 기법을 제시한다.[5] 또한 이차 단말기의 정보 전송량을 최대화하기 위한 프레임 스케줄링 기법을 제시한다. 끝으로 모의 실험을 통해 제안한 스펙트럼 활용전략의 성능을 검증하였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 CR 센서 네트워크의 구성 및 동작프레임을 보여준다. 여기서 일차 사용자(Primary user, PU) 및 이차사용자(Secondary user, SU)는 각각 하나인 환경을 고려한다. 본 논문에서는 편의상 SU의 송신국 (Transmitter, Tx)을 제외한 나머지 송,수신국(Tx, Receiver (Rx))은 단일안테나 환경을 가정하고 SU Tx는 다중안테나 환경을 고려하며, 송신 안테나의 개수는 N_t 개라고 가정하지만, 일반적인 안테나 구성에 대해 확장할 수 있다. 또한 고려하는 시스템에서는 PU와 SU는 동일한 스펙트럼을 사용하며, PU Tx와 SU Rx 간의 채널을 g_{21} , SU Tx에서 SU Rx로의 채널을 $g_{22} \in C^{N_t \times 1}$, SU Tx에서 PU Rx로의 채널을 $h_{12} \in C^{N_t \times 1}$ 로 정의한다. 이때, g_{22} 의 원소들은 분산이 1인 zero-mean Complex Gaussian 분포를 따른다고 가정하며, g_{21} 과 h_{12} 의 원소들은 분산이 α_{PL} 인 zero-mean Complex Gaussian 분포를 따른다고 가정

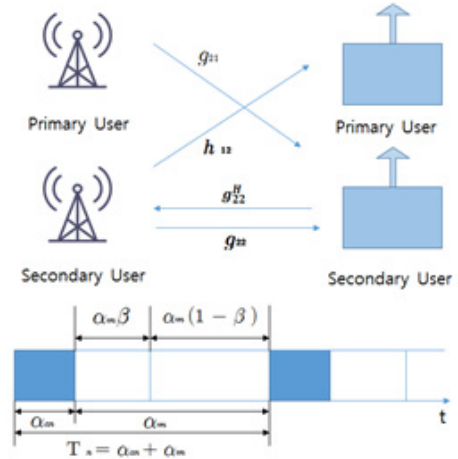


Fig. 1. System block of CR network

한다. 이때 α_{PL} 은 cross link로 인한 상대적 경로 손실 정도를 나타낸다. 즉 $\alpha_{PL} \approx 1$ 은 강한 간섭채널 (Strong interference channel)을 $\alpha_{PL} \approx 0$ 은 약한 간섭채널 (Weak interference channel) 환경을 가리킨다. 본 논문에서는 이차 기지국은 채널 h_{12} 및 채널 g_{22} , 즉, 지역적 채널 정보(local channel state information)를 완벽히 안다고 가정한다. PU Tx와 SU Tx의 최대 허용 전력은 각각 P_p, P_s 라고 두며, 편의상 다른 언급이 없는 한 $P_p = P_s = P$ 로 둔다. 일차 네트워크는 α_{an} 시간동안 스펙트럼을 점유(active)하고 있으며 α_{vn} 시간동안 해당 스펙트럼을 사용하지 않는다(vacant). 여기서 PU의 스펙트럼 사용주기를 T_n 이라 하면, $T_n = \alpha_{an} + \alpha_{vn}$ 이라 할 수 있으며, 이 T_n 의 평균값을

$$E[T_n] = E[\alpha_{an}] + E[\alpha_{vn}] = \bar{T}, \quad (1)$$

으로 가정하면, \bar{T} 는 일차 네트워크의 스펙트럼 평균 사용주기를 의미한다. 본 논문에서는 편의상 $\bar{T} = 1$ 이라 둔다. $E[\alpha_{an}] = \bar{\alpha}$ 라 둔다면, $E[\alpha_{vn}] = 1 - \bar{\alpha}$ 로 주어지게 된다. 여기서 $\bar{\alpha}$ 는 PU의 스펙트럼 사용률을 가리키는 척도가 된다.

참고로 이차 네트워크는 일차 네트워크의 통신을 보호해야하는 조건하에 동일 스펙트럼을 점유하여 전력 및 정보 송수신을 할 수 있다. 따라서 다음 장에서 일차 네트워크를 보호하면서 이차 사용자에게 효율적으로 전력을 전송하여 정보 전송률을 높이는 스펙트

럼 활용 전략을 살펴본다.

III. 다중안테나 기반 이차 네트워크 스펙트럼 활용 전략

이차 네트워크는 일차 네트워크를 보호하기 위해 일차 사용자가 스펙트럼을 점유하고 있는 구간 (α_{an}) 과 점유하고 있지 않는 구간(α_{vn})에 대해 서로 다른 전송 전략을 취할 수 있다. 다음 절에서 각각 기존의 인지무선 네트워크의 스펙트럼 활용방식에 따른 이차 네트워크의 전송방식을 살펴보고, 또한 이차 네트워크의 통신 용량을 증대시키기 위한 다중안테나 기반 스펙트럼 활용 전략을 제안하고자 한다.

3.1 기존 스펙트럼 활용방식

기존의 CR시스템에서는 일차사용자(PU)가 스펙트럼을 점유하고 있을 때 (α_{an}) 이를 보호하기 위해서 이차사용자(SU)는 sleep모드를 취함으로써 일차사용자(PU)의 스펙트럼 점유를 보장하고 간섭을 예방할 수 있다 (그림 2(a)). 일차 사용자가 점유하지 않는 구간(α_{vn})동안은 일차 사용자를 보호해주지 않아도 되므로 이차 기지국은 이 구간 동안 Energy beamforming을 통해 전력을 전송하고, 또 이차 사용자는 수집된 전력을 바탕으로 정보를 이차 기지국으로 전송할 수 있다. 이때 센서노드가 에너지를 채집하는 시간을 $\alpha_{vn}\beta$ 라고 하면 센서노드가 정보를 전송하는 시간은 $\alpha_{vn}(1-\beta)$ 라고 할 수 있다. 이를 바탕으로 이차 단말기가 채집할 수 있는 평균 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{EH,1} = P\eta(1-\bar{\alpha})\beta \| \mathbf{g}_{22} \|^2, \quad (2)$$

여기서 η 는 무선 전력 변환 효율을 나타낸다. 이를 바탕으로 이론적 정보 전송량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_1 = (1-\beta)(1-\bar{\alpha}) \log_2 \left(1 + \frac{P\eta(1-\bar{\alpha})\beta \| \mathbf{g}_{22} \|^2 \| \mathbf{g}_{22} \|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (3)$$

여기서 σ_n^2 은 시스템의 잡음 전력을 나타낸다.

또한 [6]와 같이 일차 기지국의 신호는 훌륭한 전력 채집원이므로 α_{an} 동안 이차 사용자 수신기는 sleep모

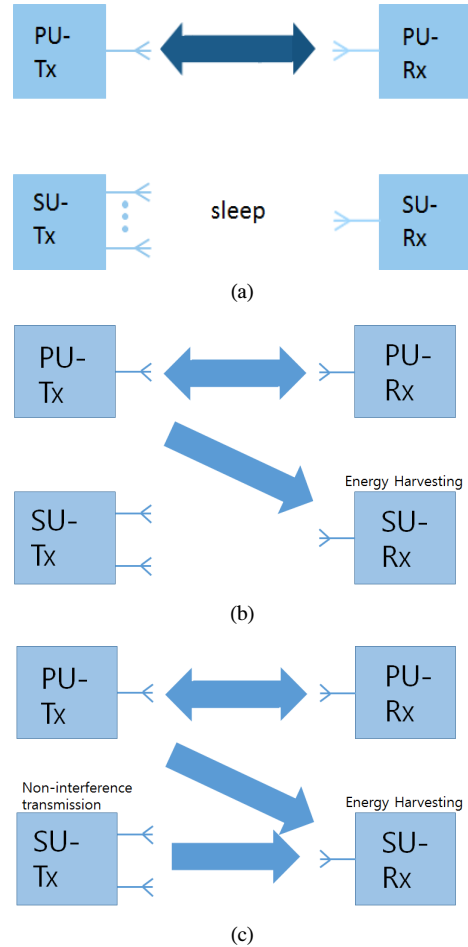


Fig. 2. SU's operations when PU is active

드가 아닌 전력 채집을 하여 추가적인 전력을 확보할 수 있다 (그림 2(b)). 이 경우 이차 단말기가 채집할 수 있는 평균 전력 및 이론적 정보 전송량은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$P_{EH,2} = P\eta(\bar{\alpha}|g_{21}|^2 + (1-\bar{\alpha})\beta \| \mathbf{g}_{22} \|^2) \quad (4)$$

$$R_2 = (1-\beta)(1-\bar{\alpha}) \log_2 \left(1 + \frac{P\eta(\bar{\alpha}|g_{21}|^2 + (1-\bar{\alpha})\beta \| \mathbf{g}_{22} \|^2) \| \mathbf{g}_{22} \|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (5)$$

3.2 제안하는 공간적 간섭제거(Interference nulling)기반 스펙트럼 활용 전략

이차 기지국이 다중안테나를 가지고 있을 경우, 일차 네트워크가 스펙트럼을 사용하고 있더라도 이차 기지국은 일차 네트워크에 간섭을 주지 않으면서 이

차 단말기에 전력을 전달할 수 있다. 즉 Zero Forcing 기반의 에너지 빔포밍 벡터를 이용하여, 일차 단말기에 간섭을 주지 않으면서 이차 단말기에 에너지를 전달할 수 있다 (그림 2(c)).

따라서, 송신신호 벡터 \mathbf{x} 를 채널 \mathbf{h}_{12} 에 직교하도록 설계한다면 이차 기지국은 일차사용자에 간섭을 주지 않을 수 있으며 이에 따른 \mathbf{x} 는 다음과 같은 형태를 가져야 한다.

$$\mathbf{x} = \frac{\sqrt{P}}{\|\mathbf{P}_{\mathbf{h}_{12}} \mathbf{x}'\|} \mathbf{P}_{\mathbf{h}_{12}} \mathbf{x}' \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{P}_{\mathbf{h}_{12}}$ 는 Orthogonal Projection matrix 로서 다음과 같은 수식으로 주어진다.

$$\mathbf{P}_{\mathbf{h}_{12}} = \mathbf{I}_{N_1} - \mathbf{h}_{12}(\mathbf{h}_{12}^H \mathbf{h}_{12})^{-1} \mathbf{h}_{12}^H \quad (7)$$

이때 \mathbf{x}' 는 이차 기지국이 이차 단말기에 전력을 최대한으로 전달할 수 있도록 설계되어야 한다. 즉 다음과 같은 실질적 채널(effective channel)의 Matched filtering 효과를 낼 수 있도록 다음의 수식과 같이 설계할 수 있다.

$$\mathbf{x}' = (\mathbf{g}_{22}^H \mathbf{P}_{\mathbf{h}_{12}})^H = \mathbf{P}_{\mathbf{h}_{12}} \mathbf{g}_{22} \quad (8)$$

참고로 일차 네트워크가 스펙트럼을 사용하지 않을 경우에는 3.1절의 스펙트럼 활용 전략과 동일한 전략을 통해 전력 송신 및 정보 송신을 할 수 있다. 이를 바탕으로 하였을 때 이차 단말기가 채집할 수 있는 평균 전력 및 이론적 정보 전송량은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$P_{EH,3} = P\eta \left(\bar{\alpha} \left(\|\mathbf{P}_{\mathbf{h}_{12}} \mathbf{g}_{22}\|^2 + |g_{21}|^2 \right) + (1 - \bar{\alpha}) \beta \|\mathbf{g}_{22}\|^2 \right), \quad (9)$$

$$R_3 = (1 - \beta)(1 - \bar{\alpha}) \log_2 \left(1 + \frac{P_{EH,3} \|\mathbf{g}_{22}\|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (10)$$

따라서 이 β 값에 따라서 센서노드의 정보전송량이 달라질 수 있으며, 다음 장에서 최적화된 β 를 결정하는 방식, 즉 이차 네트워크의 프레임 스케줄링을 최적화하는 방식을 제안한다.

IV. 이차 네트워크 프레임 스케줄링 최적화

앞의 III절에서 살펴본 다양한 스펙트럼 활용전략에 따라 이론적 정보 전송량이 각각 R_1, R_2, R_3 로 주어지는 것을 확인하였다. 즉 정보 전송량을 다음과 같이 일반화된 수식으로 표현할 수 있다.

$$R_g = (1 - \beta)(1 - \bar{\alpha}) \log_2 (1 + K_1 (\bar{\alpha} K_2 + K_3 (1 - \bar{\alpha}) \beta)) \quad (11)$$

여기서 K_1, K_2, K_3 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$K_1 = \frac{P\eta \|\mathbf{g}_{22}\|^2}{\sigma_n^2}, \quad K_3 = \|\mathbf{g}_{22}\|^2,$$

$$K_2 = \begin{cases} 0 & \text{for } R_1 \\ |g_{21}|^2 & \text{for } R_2 \\ \left(\|\mathbf{P}_{\mathbf{h}_{12}} \mathbf{g}_{22}\|^2 + |g_{21}|^2 \right) & \text{for } R_3 \end{cases} \quad (12)$$

이때 β 값이 커짐에 따라 채집되는 전력량이 증가하여 이차 단말기가 정보 전송을 위해 많은 전력을 쓸 수 있다. 하지만 β 가 커지면 그만큼 정보를 전송할 수 있는 시간이 줄어들게 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 (11)의 이론적 정보 전송량 R_g 는 β 에 따라 달라지며, 이들을 최대가 되도록 하는 β 를 찾아 주는 과정이 중요하다. 하지만 일반적으로 (11)의 R_g 를 최대로 하는 β 는 닫힌 해의 형태로 구할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 R_g 를 최대로 하는 β 를 수치해석적으로 찾는 방식을 제시할 것이며, 다음 Proposition 1은 이를 위해 일반화된 R_g 의 중요한 특성을 기술한다.

Proposition 1. R_g 는 $\beta \in [0, 1]$ 에서 concave이다.

(증명) β 에 따른 1차 편미분값($0 \leq \beta \leq 1$)

$$\begin{aligned} \frac{dR_g}{d\beta} = & -(1 - \bar{\alpha}) \log_2 (1 + K_1 (\bar{\alpha} K_2 + K_3 (1 - \bar{\alpha}) \beta)) \\ & + \frac{(1 - \bar{\alpha})^2 (1 - \beta) K_1 K_3}{1 + K_1 (\bar{\alpha} K_2 + K_3 (1 - \bar{\alpha}) \beta)} \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 β 에 따른 2차 편미분값은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d^2 R_g}{d\beta^2} = \frac{2(1-\bar{\alpha})^2 K_1 K_3}{1 + K_1(\bar{\alpha} K_2 + K_3(1-\bar{\alpha})\beta)} \frac{(1-\beta)(1-\bar{\alpha})^3 K_1^2 K_3^2}{(1 + K_1(\bar{\alpha} K_2 + K_3(1-\bar{\alpha})\beta))^2} \quad (14)$$

따라서 K_1, K_2, K_3 는 모두 양수이므로, (14)는 $0 \leq \bar{\alpha} \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$ 의 범위에서 $\frac{d^2 R_g}{d\beta^2} \geq 0$ 을 알 수 있다. 따라서 R_g 는 $\beta \in [0, 1]$ 에서 concave이다. ■

즉 Proposition 1로부터 $\beta \in [0, 1]$ 에서 R_g 가 최대가 되는 지점은 유일하게 존재함을 알 수 있다. 또한 $\beta \in [0, 1]$ 에서 변곡점을 가진다면 즉, (13)으로부터 $\frac{dR_g}{d\beta} = 0$ 을 만족하는 β 이 존재한다면 이 값이 R_g 를 최대로 하는 최적화된 β 이다. 만약 $\beta \in [0, 1]$ 에서 변곡점이 존재하지 않는다면 $\beta = 0$ 지점에서 항상 최대 R_g 를 가지게 된다.

물리적으로 $\beta = 0$ 지점에서 항상 최대 R_g 를 가지게 되는 경우는, $K_1 K_2$ 의 값이 매우 클 때, 즉 이차 단말기가 일차 사용자가 스펙트럼을 사용하는 구간 ($E[\alpha_{vm}] = \bar{\alpha}$) 동안 충분한 전력을 채집하였을 때, 이 전력만으로 정보를 전송하는데 문제가 없을 때 일차

사용자가 비어있는 시간($E[\alpha_{vm}] = 1 - \bar{\alpha}$) 동안에는 이차 단말기가 정보를 전송하는데 프레임을 모두 할당한다는 의미가 된다.

따라서 위의 분석 결과를 바탕으로 최적화된 β 찾는 것은 다음 알고리즘 1의 Bisection 방식[7]에 기반하여 해를 찾을 수 있다.

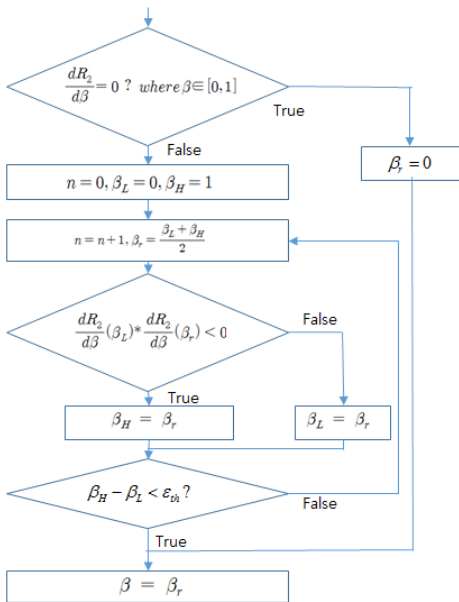
Algorithm 1의 첫 번째 조건문에서 (13)으로부터 $\frac{dR_g}{d\beta} = 0$ 을 만족하는 β 가 구간[0,1]에 존재하는지 판단은 양 끝 구간에서의 편미분 값의 곱의 부호를 보고 판단할 수 있다. 즉

$\left. \frac{dR_g}{d\beta} \right|_{\beta=0} \left. \frac{dR_g}{d\beta} \right|_{\beta=1} < 0$ 이면, $\frac{dR_g}{d\beta} = 0$ 을 만족하는 β 가 구간[0,1]에 존재한다.

V. 시뮬레이션

본 장에서는 모의실험을 통하여 CR 네트워크에서 이차 사용자가 기존의 스펙트럼 활용방식을 이용할 때와 제안한 스펙트럼 활용 전략을 이용할 때 얻을 수 있는 성능을 비교하였다. 편의상 무선 전력 변환 효율은 $\eta = 1$ 로 가정하였다.

그림 3은 $\alpha_{PL} = 0.7$ 이고, PU의 스펙트럼 사용률을 가리키는 척도를 $\bar{\alpha} = 0.4$ 로 설정하고, 이차 기지국 송신안테나의 개수를 4로 설정하였을 때 SNR에 따른 Achievable rate을 비교하였다. R_1, R_2, R_3 는 각각 수식 (3), (5), (10)과 같이 3.1절의 기존 스펙트럼 활용 전략들과 3.2절에서 제안하는 공간적 간섭제거 기반 스펙트럼 활용 전략을 활용하였을 때 얻을 수 있는



Algorithm 1. Finding optimized β based on Bisection method

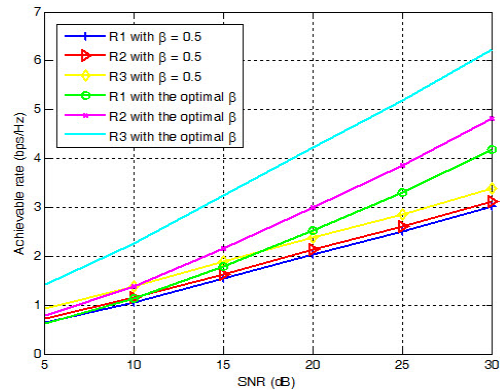


Fig. 3. Achievable rate comparison when $\alpha_{PL} = 0.7$ and $\bar{\alpha} = 0.4$

전송 용량을 나타낸다. 또한 알고리즘 1을 이용하여 β 를 최적화하였을 때와 $\beta = \frac{1}{2}$ 로 고정하였을 때에 대한 성능을 비교하였다. 그림에서와 같이 알고리즘 1을 활용하여 β 값을 최적화하였을 때 성능이 그렇지 않을 때 보다 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 다중안테나를 이용한 공간적 간섭제거 기반 스펙트럼 활용 전략이 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

그림 4은 Algorithm 1을 통해 β 이 Iteration에 따른 수렴성을 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 10번의 Iteration이내에 최적화된 β 를 찾을 수 있음을 알 수 있다. 또한 SNR= 5dB일 때가 SNR=15dB일 때 보다 더 높은 β 에서 수렴하는 것을 확인할 수 있는데, 본 논문에서 잡음의 전력은 고정하였기 때문에 SNR이 낮다는 것은 그만큼 기지국에서 낮은 전력으로 신호를 송신하는 것을 의미한다. 그만큼 적은 전력을 이차 단말기에 전달할 수 있으며, 따라서 일차 사용자가 스펙트럼을 점유하지 않는 기간 동안, 정보 전달에 쓰일 전력을 채집하는 구간을 늘려서 전체 전력 채집량을 늘려야한다. 따라서 낮은 SNR에서 β 가 큰 값에서 수렴한다.

그림 5에는 이차 기지국의 안테나의 개수에 따라 각 스펙트럼 활용전략에 따른 전송 용량을 비교하였다. 이때 SNR=15dB로 가정하였으며, $\alpha_{PL} = \{0.2, 0.7\}$ 환경에 대해 각각 비교하였다. 이때 Algorithm1을 통해 최적의 β 구하여 프레임 스케줄링을 하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 안테나 수가 증가함에 따라 전송 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 재미있는 것은 공간적 간섭제거 기법을 통해 전력을 전달하여 얻은 R_3 의 경우 그 증가폭 또는 기울기가 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 안테나의 개수가 늘어날수록 공간적 자유도가 커져, 일차 사용자에게

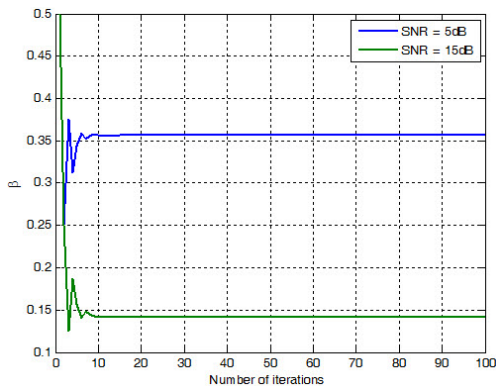


Fig. 4. Convergence of β when SNR= 5dB, 15dB

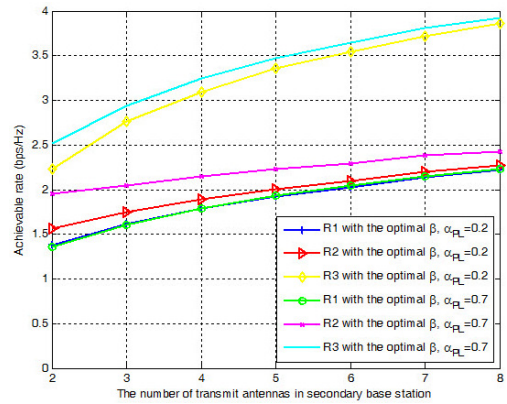


Fig. 5. Achievable rate comparison when $\alpha_{PL}=0.2$ and 0.3

에게 간섭을 주지 않도록 하는 동시에 이차 단말기에 전력을 보다 효율적으로 전달할 수 있기 때문이다.

또한 흥미로운 사실은, 강한 간섭 채널($\alpha_{PL} = 0.7$)일 때의 전송 용량이 약간 간섭 채널($\alpha_{PL} = 0.2$)일 때의 전송용량보다 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 전력을 채집하는 단말기 입장에서 간섭신호들은 훌륭한 전력 채집원(Source)으로 활용할 수 있다. 따라서 간섭이 강한 채널환경에서 간섭신호들로부터 많은 전력을 채집하여, 정보 전송하는데 활용할 수 있다. 그림에서 R_1 의 경우 교차 링크의 채널 경로 손실 α_{PL} 에 상관없이 같은 값을 가지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 R_1 의 경우, 일차 네트워크 간섭 채널 신호를 활용하여 전력을 채집하지 않기 때문이다.

그림 6에서 그림 결과에 대해 얻어지는 최적의 β 의 평균을 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 간섭 신호가 강하거나 제안하는 다중안테나 기반의 스펙트럼 활용 방식을 적용하였을 때 최적의 β 이 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 안테나의 개수가 증가함에 따라 최적의 β 이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 이차 단말기에서 보다 많은 전력을 채집할 수 있는 환경일 때 (안테나의 개수를 늘리고, 간섭신호가 강하고, 제안하는 스펙트럼 활용방식을 취할 때), 짧은 시간에 충분한 전력을 채집할 수 있기 때문에, β 을 줄여 정보 전송하는 시간을 증가시키는 것이 유리하다는 것을 의미한다. 특히, R_3 의 경우 β 값이 거의 0에 가까운 값을 가지게 되는데, 이는 이차 단말기가 일차 사용자가 스펙트럼을 사용하는 구간 ($E[\alpha_{cm}] = \bar{\alpha}$) 동안 충분한 전력을 채집하였기 때문에 이 전력만으로 정보를 전송하는데 문제가 없게 되며, 일차 사용자가 비어있는 시간($E[\alpha_{cm}] = 1 - \bar{\alpha}$) 동안에

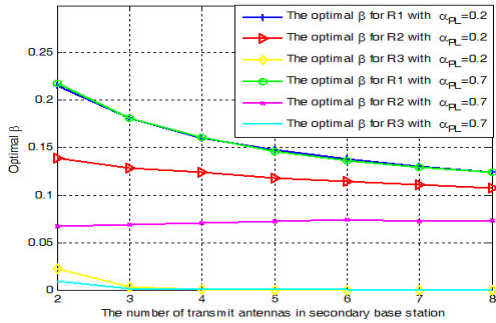


Fig. 6. Comparison of the optimal β when $\alpha_{PL}=0.2$ and 0.3

는 이차 단말기가 정보를 전송하는데 프레임을 할당할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 무선 전력전송 기반의 CR 통신 시스템에서 이차 기지국이 다중 안테나(Multi-antenna)를 사용하여, PU에 대한 간섭 제거 및 에너지 빔포밍을 할 수 있는 전송기법을 제안하고, 이에 따른 정보 전송량을 최대로 얻기 위한 프레임 스케줄링 기법을 제시하였다. 즉, 제안한 기법들에서 일차사용자(PU)에게 간섭을 주지 않기 위해서 ZF기반의 전처리 기법을 이용하였고, 최적화된 프레임 스케줄링을 위해 Bisection method기반의 알고리즘을 제안하였다. 모의실험을 통해 다중안테나 기반의 제안한 기법이 PU에 간섭을 주지 않는 동시에 정보전송량을 개선시킬 수 있음을 확인하였으며, 특히, 주변 간섭환경에 따라 전력채집 구간 및 정보 전달 구간을 적절히 조절할 때 채널 용량이 크게 증대됨을 확인할 수 있었다.

References

[1] H. Lee, K. Han, Y. Hwang, and S. Choi, "Point-to-point communication of cognitive radios via underlay spectrum sharing," *J. KICS*, vol. 34, no. 9, Sept. 2009.

[2] J. Park, Y. Park, S. Hwang, and B. Jeong, "Low-complexity GSVD-based beamforming and power allocation for a cognitive radio network," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E95-B, no. 11, Nov. 2012.

[3] S. Yoo, K. Kang, H. Jung, and S. Park, "CR technology and activation plan for white space

utilization," *J. KICS*, vol. 39B, no. 11, Nov. 2014.

[4] J. Cho, S. Jang, W. Jung, and J. Kim, "Projection of spatial correlation-based antenna selection for cognitive radio systems in correlated channels," *J. KICS*, vol. 37A, no. 1, Jan. 2012.

[5] W. Seah, Z. Eu, and H. Tan, "Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP) - survey and challenges," in *Proc. IEEE Int. Conf. Wirel. VITAE*, pp. 1-5, Aalborg, Denmark, May 2009.

[6] S. Lee, E. Jeong, C. Nam, J. Han, and J. Park, "Spectrum utilization strategies in cognitive radio sensor network powered by wireless energy transfer," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun.*, pp. 332-333, Jul. 2015.

[7] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.

이 성 복 (Sung-bok Lee)



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

박 재 현 (Jaehyun Park)



2003년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 학사
 2010년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 2010년~2013년 : 한국전자통신연구원, 선임연구원
 2013년~2014년 : Imperial College

London, Research Associate
 2014년~현재 : 부경대학교 조교수
 <관심분야> 다중안테나 기반 통신 신호처리, 동시 전력 및 정보 전송 기술, 인지무선기술

강 규 민 (Kyu-Min Kang)



1997년 2월 : 포항공대 전기전
자공학과 학사

1999년 2월 : 포항공대 전기전
자공학과 석사

2003년 2월 : 포항공대 전기전
자공학과 박사

2003년 8월~현재 : 한국전자통
신 연구원 책임연구원

<관심분야> 통신 시스템/네트워크, 인지무선기술

박 윤 주 (Yunju Park)



2002년 2월 : 경북대학교 수학
과 학사

2004년 2월 : KAIST 수리과학
과 석사

2009년 1월 : KAIST 수리과학
과 박사

2009년 2월~2009년 12월 : KAIST
정보전자연구소 박사후연구원

2010년~현재 : KAIST부설 한국과학영재학교 수리정
보과학부 교사

<관심분야> 무선통신, 통신수학, 대기이론