

주 사용자의 간섭을 고려한 Opportunistic Spatial Orthogonalization의 활성 부 사용자 선택 알고리즘

준회원 유 강 현*, 정회원 김 용 화**, 이 한 별*, 종신회원 김 성 철***

Active Secondary User Selection Algorithm of Opportunistic Spatial Orthogonalization Considering Interference by a Primary User

Kang-Hyun Yoo* Associate Member, Yong-Hwa Kim**, Han-Byul Lee* Regular Members, Seong-Cheol Kim*** Lifelong Member

요 약

Cong Shen과 Micael P. Fitz에 의해 제안된 OSO(opportunistic spatial orthogonalization)는 주 사용자가 모든 라이선스 주파수 대역을 점유하고 있는 동안에 부 사용자들이 그 주파수 대역을 동시에 사용할 수 있도록 하는 기법이다. 본 논문에서는 single-input multi-output system을 기반으로 하여, 주 사용자의 송신 전략을 유지하며 주 사용자의 송신기에서 활성 부 사용자의 수신기로 가는 간섭을 고려한 활성 부 사용자 선택 알고리즘을 소개한다. 제안한 알고리즘은 주 사용자에게 최소한의 전송 용량(throughput)을 보장하며 기존 OSO 방법보다 더 높은 성능을 보인다. 우리는 모의실험을 통해 여러 제약 조건 하에서 제안한 알고리즘의 성능을 검증한다.

Key Words : 인지 무선 네트워크(Cognitive Radio Networks), Opportunistic Spatial Orthogonalization, 간섭 정렬, Single-Input Multiple-Output

ABSTRACT

The opportunistic spatial orthogonalization (OSO) scheme, proposed by Cong Shen and Michael P. Fitz, allows the existence of secondary users during the period in which the primary user is occupying all licensed bands. This paper introduces an active secondary user selection algorithm which mitigates the interference from the primary user transmitter to the secondary user receiver based on single-input multi-output system without altering a primary user's transmission strategy. A proposed algorithm guarantees the minimum average throughput of the primary user and overcomes the average sum throughput of a conventional OSO. We have numerically analyzed the average throughput under various constraints

I. 서 론

현재 상업적으로 무선 통신에서 쓰이는 대부분의

스펙트럼 대역들은 무선 사업자들이 대부분 점유하고 있다. 이러한 상황에서 2002년에 Federal Communications Commission (FCC)은 점유되어 있는 라이

※ 본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0000316)

* 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 전파 및 무선통신연구실 (khyoo@maxwell.snu.ac.kr, hblee@maxwell.snu.ac.kr)

** 목포해양대학교 해양정보통신공학부(yhkim@mmu.ac.kr)

*** 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (sckim@maxwell.snu.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-07-326, 접수일자 : 2011년 7월 29일, 최종논문접수일자 : 2011년 11월 10일

선스(licensed) 주파수 대역이 충분히 이용되지 않고 있다는 보고서를 제출하였다^[1]. 시간, 공간, 주파수 차원에서 주파수 사용의 비효율성은 엄격한 주파수 관리 정책으로 인하여 발생한다. 인지 무선 네트워크(Cognitive radio network)는 이러한 문제점을 소프트웨어적인 방법으로 해결하기 위해 제안되었다. 인지 무선 네트워크에서는 라이선스 주파수를 사용하는 것이 허락되지 않은 부 사용자(secondary user)가 주변의 주파수 사용 환경을 인지하여 비효율적으로 사용되고 있는 라이선스 주파수 대역을 주 사용자(primary user)의 성능을 저하시키지 않고 사용하는 것이 가능하다^[2].

Non-centralized 인지 무선 네트워크에서 부 사용자에 의한 주 사용자에 미치는 간섭을 줄이는 효과적인 다양한 기술들이 연구되어 왔다^{[3]-[5]}. 기존에 소개된 기술들에서는 부 사용자들이 주 사용자의 채널 상태 정보(CSI, channel state information)를 완벽하게 알아야 한다. 하지만 실제 MIMO(multi-input multi-output) 시스템 환경에서 주 사용자의 CSI를 부 사용자들이 모두 완벽히 아는 것은 쉽지 않은 일이다. 그리고 간섭 정렬(IA, interference alignment) 기술들을 MIMO에서 사용하기 위해서는 global CSI가 각 송신기에서 요구된다^[5]. 다중 사용자 다이버시티(MUD, multi-user diversity)에 대한 기술들도 인지 무선 네트워크의 성능을 향상시키기 위해서 다양하게 연구되었다^{[6]-[8]}. 많은 사용자가 동시에 존재하는 환경에서 MIMO 시스템의 실현이 어렵기 때문에^{[3],[4]}, Cong Shen과 Michael P. Fitz는 SIMO(single-input multi-output) 시스템에서 주 사용자의 송신 전략에 변화를 주지 않고 부 사용자가 라이선스 밴드를 주 사용자와 동시에 이용할 수 있는 OSO(opportunistic spatial orthogonalization) 기법을 소개하였다. OSO는 각 채널들의 독립성, 임의성, MUD을 활용하여 주 사용자 수신기에 부 사용자에 의해 가해지는 간섭을 최소화하여 주 사용자의 전송 용량을 보장하며 부 사용자가 라이선스 밴드를 이용할 수 있게 한다. 실제 환경의 OSO에서 동일한 라이선스 밴드를 사용하는 주 사용자와 부 사용자는 항상 근접한 거리에 위치한다. 그러므로 주 사용자에 의해 부 사용자에 가해지는 간섭인 I_p 는 항상 존재하며 부 사용자의 성능을 저하시키는 주요 요인으로 작용한다. 하나의 주 사용자와 하나의 부 사용자가 서로 간섭을 미치는 경우에 최대 획득 가능한 평균 전송 용량(throughput)과 성능 저하에 관한 연구는 [9]에 수행되어 있다. I_p 는 이처럼

부 사용자의 성능을 저하시키는 큰 원인 중 하나임에도 불구하고 기존의 연구들에서는 이를 줄이기 위한 논의가 충분히 되지 않았으며, OSO에서도 다루어지지 않았다.

본 논문에서는 SIMO OSO 시스템에서 I_p 를 고려하여 활성 부 사용자들의 성능을 향상시키는 활성 부 사용자 선택 알고리즘을 두 가지 경우를 가정하여 소개한다. 여기서 활성 부 사용자란 라이선스 주파수 대역을 이용하여 통신을 하도록 주 사용자로부터 허가를 받은 부 사용자를 의미한다. 첫 번째 경우는 주 사용자의 수신기에서 각 부 사용자로부터 오는 간섭 전력을 각각 계산하고, 부 사용자들의 전송 용량 정보를 주 사용자의 수신기에서 수신하여 최적의 부 사용자들의 조합을 선택하게 된다. 두 번째 경우에서는 실제 인지 무선 네트워크 시스템의 구현 환경을 고려하여 주 사용자에 가해지는 추가적인 작업을 최소화하기 위해 주 사용자의 수신기 대신에 협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing) 기법들에서 사용되는 융합 센터(fusion center)가 지원 부 사용자들의 정보를 수합하고 활성 부 사용자를 선택을 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 SIMO 시스템 모델을 제시한다. 3장에서는 기존의 SIMO OSO와 활성 부 사용자 선택 알고리즘을 두 가지 경우에서 소개한다. 4장에서는 제안한 알고리즘의 성능을 모의실험을 통해 검증하고 논의하며 5장에서는 결론을 맺는다.

진한 문자로 표시되는 y 는 벡터이며 $y(n)$ 은 y 의 n 번째 요소를 나타낸다. $E_X[\cdot]$ 은 X 의 분포에 대한 랜덤 변수들의 평균이다. $\langle a, b \rangle = \sum_i a(i)b^*(i)$ 는 복소수 벡터 a 와 b 의 내적이고 $\|a\|^2 = \langle a, a \rangle$ 는 a 의 norm을 나타낸다.

II. 시스템 모델

OSO 시스템 모델을 그림 1에 나타내었다. 하나의 주 사용자가 있고 K 개의 지원 부 사용자들이 존재한다. N 은 라이선스 밴드 대역 사용을 허가받은 활성 부 사용자들의 수이고 $(K-N)$ 은 비활성화 부 사용자들의 수이다. N_{PA} 는 주 사용자의 수신기나 융합 센터와 정보를 주고받는 부 사용자의 수이며 작은 값을 갖는다. 주 사용자는 라이선스 밴드를 점유해 사용하고 있으며 PU_1-Tx 로부터 PU_1-Rx 로 신호를 송신한다. 사용자 1은 주 사용자이며 사용자

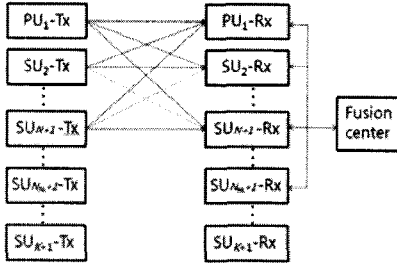


그림 1. 시스템 모델

2, 3, ..., K+1들은 지원 부 사용자들을 의미한다. 우리는 1개의 송신 안테나와 L_r 개의 수신 안테나를 갖는 SIMO 시스템을 가정한다. h_{ij} 는 j 번째 사용자 송신기로부터 i 번째 사용자 수신기로 가는 채널 이득 벡터를 나타낸다($i, j = 1, 2, \dots, K+1$).

MAC(multiple-access channel)에서 l 번째 사용자의 수신기로 들어오는 신호는 아래와 같다.

$$y_l = \mathbf{h}_{l,l}x_l + \sum_{k=1, k \neq l}^{N+1} \mathbf{h}_{l,k}x_k + z_l \quad (1)$$

여기서 x_l 과 y_l 은 각각 l 번째 사용자의 송신 벡터와 $(1 \times L_r)$ 의 크기를 갖는 수신 벡터를 의미한다($l = 1, 2, \dots, K+1$). z_l 은 i.i.d(independent and identically distributed) 가우시안 백색 잡음(AWGN, additive white Gaussian noise)이다. 즉, $z_l \sim CN(0, N_0)$ 이다. 여기서 N_0 는 AWGN의 전력 스펙트럼 밀도이다. 주 사용자의 송신기 전력 제약은 $E[|x_1|^2] \leq P_1$ 이고, m 번째 부 사용자의 송신기의 전력 제약은 $E[|x_m|^2] \leq P_2$ 로 모든 지원 부 사용자의 송신기에서 동일하다($m = 2, 3, \dots, K+1$). $\{h_{i,j}\}_{i,j=1}^{K+1}$ 들은 i.i.d이며 $h_{i,j}(n) \sim CN(0,1)$ 을 만족한다($n = 1, \dots, L_r$). 따라서 OSO에서 standard block-fading 모델과 SIMO 레일레이 페이딩 채널을 가정할 수 있다¹⁰⁾.

OSO 기법에서는 하나의 강력한 가정이 필수적이다. 그 것은 모든 지원 부 사용자 송신기들은 PU_1-Rx 에 직교 파일럿들을 송신하여, $\{h_{1,j}\}_{j=1}^{K+1}$ 을 PU_1-Rx 에서 완벽히 알 수 있어야 한다는 것이다. PU_1-Rx 는 채널 정보들을 통해 각 지원 부 사용자로부터의 간섭을 계산하여 허용 가능한 간섭을 가지는 부 사용자 수신기들로 알림 신호를 보낸다. 이는 주 사용자의 수신기가 기지국일 때 사용 가능한 가정이다. 또한 주 사용자가 이 채널정보들을 브로

드 캐스트(broadcast) 할 필요는 없으며, coherence 시간 동안 채널 이득 벡터들은 상수이다. 지금까지 나열한 가정들은 모두 기존의 OSO와 동일하다. 본 논문에서 추가적으로 가정하는 것들은 다음과 같다. 모든 지원 부 사용자의 수신기들은 PU_1-Tx 로부터 오는 간섭만을 고려한 전송 용량을 계산할 수 있다. 지원 부 사용자들 중에서 일부 수신기들만이 전송 용량을 PU_1-Rx 나 융합 센터로 보낸다. 본 논문에서는 활성 부 사용자를 선택하는 과정에서 정보를 전송하는 소수의 부 사용자들을 연산대상 부 사용자라 정의한다. 이러한 전송 과정들은 일반적으로 피드백을 하는 것과 유사한 방식으로 라이선스 주파수 영역이 아닌 다른 대역을 이용하여 한다. 협력 스펙트럼 감지 기술과는 다르게 본 논문의 융합 센터는 부 사용자 수신기들로부터 수신한 정보를 토대로 연산대상 부 사용자 중에 어느 것이 활성 부 사용자인지 선택하여 이를 부 사용자들에게 알리게 된다. PU_1-Rx 와 마찬가지로 융합 센터도 수신 정보들을 브로드 캐스트 하지 않아도 된다.

III. 활성 부 사용자 선택 알고리즘

다중 사용자가 작동하는 OSO에서는 주 사용자와 다른 활성화 부 사용자들에 의해 활성 부 사용자에게 다중 사용자 간섭(multi-user interference)이 발생한다. 채널 임의성과 MUD를 이용하여 주 사용자와 활성 사용자들 사이에 직교 공간을 만드는 기존의 OSO와 앞서 설명한 시스템 모델을 기반으로, 우리는 I_p 를 고려함과 동시에 지원 부 사용자들 중에서 적은 수의 부 사용자들만을 이용하는 활성 부 사용자 선택 알고리즘을 제안하였다.

3.1 OSO Overview¹⁰⁾

OSO의 주요 목적은 채널 랜덤성과 MUD를 향상시키는 것이다. PU_1-Rx 에서 수신되는 신호는 아래와 같다.

$$y_1 = \mathbf{h}_{1,1}x_1 + \underbrace{\sum_{k=2}^{N+1} \mathbf{h}_{1,k}x_k}_{interference} + z_1 \quad (2)$$

이 신호를 디코딩하면 아래와 같은 식이 주어진다.

$$\tilde{y}_1 = \|\mathbf{h}_{1,1}\|^2 x_1 + \sum_{k=2}^{N+1} \langle \mathbf{h}_{1,1}, \mathbf{h}_{1,k} \rangle x_k + \tilde{z}_1 \quad (3)$$

여기서 $\tilde{z}_1 = \langle z_1, \mathbf{h}_{1,1} \rangle$ 이다. 간섭이 존재하지 않을 때는 MRC (maximum ratio combining) 방법인 정합 필터가 SIMO OSO 시스템에서 최적의 디코더로 사용된다. 활성 부 사용자들의 송신기들로부터 $\text{PU}_1\text{-Rx}$ 로 수신되는 모든 간섭 전력들의 합은 다음과 같이 표현할 수 있다^{18, eq. (24)}.

$$\beta_K^{(N)} = \frac{\sum_{k=2}^{N+1} |\langle \mathbf{h}_{1,k}, \mathbf{h}_{1,1} \rangle|^2}{\|\mathbf{h}_{1,1}\|^2} \quad (4)$$

다른 송신기들로부터 수신되는 신호들은 각 수신단에서 간섭 전력으로 작용하고 각 사용자들의 성능을 저하시킨다. 활성 부 사용자가 다수 존재할 때, $\text{PU}_1\text{-Rx}$ 에서 계산되는 주 사용자의 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)의 값은 다음과 같다.

$$\text{SINR}_{1,\text{SUM}}(\beta_K^{(N)}) = \frac{\|\mathbf{h}_{1,1}\|^2 P_1}{\beta_K^{(N)} P_2 + N_0} \quad (5)$$

주 사용자의 전송 용량인 C_1 은 아래와 같이 주어진다.

$$C_1 = \log_2(1 + \text{SINR}_{1,\text{SUM}}(\beta_K^{(N)})) \quad (6)$$

인지 무선 시스템에서 주 사용자의 전송 용량은 자신이 홀로 동작할 때와 같아야 하는데, SIMO 페이딩 채널에서는 채널 이득 벡터들이 큰 폭으로 변화하기 때문에 일정한 QoS(Quality of Service)를 제공하는 것이 어렵다. 따라서 주 사용자의 전송 용량을 보장하기 위해서 활성 부 사용자 선택에 있어 주 사용자의 수신기에 일정 이하의 간섭만을 허용하는 다음의 부등식을 만족해야 한다.

$$\gamma_{thr(\text{dB})} \geq \gamma_{\text{dB}} = \text{SNR}_{1(\text{dB})} - \text{SINR}_{1(\text{dB})}(\beta_K^{(N)}) \quad (7)$$

이 식에서 $\text{SNR}_{1(\text{dB})}$ 은 다음과 같다^{18, eq. (8)}.

$$\text{SNR}_{1(\text{dB})} = \frac{\|\mathbf{h}_{1,1}\|^2 P_1}{N_0} \quad (8)$$

(4)의 식에서 볼 수 있듯이 간섭 전력은 주 사용자와 부 사용자 채널 벡터들 간의 내적들의 합으로

정해진다. 기존의 OSO에서는 주 사용자에게 간섭을 적게 주는 순서대로 (7)의 식을 만족하는 범위에서 활성 부 사용자들이 결정된다.

3.2 활성 부 사용자 선택 알고리즘

본 절에서는 활성 부 사용자 선택 알고리즘을 기술하기 위해서, 새로운 식들을 정의하였다. 다음의 식은 $N = 1$ 인 경우에 m 번째 부 사용자가 활성 부 사용자일 때 $\text{PU}_1\text{-Rx}$ 에서 계산되는 SINR의 값이다.

$$\text{SINR}_{1,m} = \frac{\|\mathbf{h}_{1,1}\|^2 P_1}{|\langle \mathbf{h}_{1,m}, \mathbf{h}_{1,1} \rangle|^2 P_2 / \|\mathbf{h}_{1,1}\|^2 + N_0} \quad (9)$$

시스템 모델에서 가정한 바와 같이, $\text{PU}_1\text{-Tx}$ 는 모든 SU에 대하여 각각의 $\text{SINR}_{1,m}$ 을 계산할 수 있다. 서술의 편의성을 위하여, 우리는 $\text{SINR}_{1,t} \geq \text{SINR}_{1,t+1}$ 이 모든 t 에서 만족한다고 가정한다($t = 2, \dots, K$). $N > 1$ 인 경우에 m 번째 부 사용자 수신기에서 다른 활성 부 사용자들에 의해 발생하는 간섭 전력은 아래와 같다.

$$I_{\text{SU}_m}^{(N)} = \sum_{k=2, k \neq m}^{N+1} \frac{|\langle \mathbf{h}_{m,m}, \mathbf{h}_{m,k} \rangle|^2}{\|\mathbf{h}_{m,m}\|^2} \quad (10)$$

그리고 주 사용자의 송신기에 의해 m 번째 부 사용자의 수신기에서 생기는 간섭은 아래의 식과 같다.

$$I_{\text{PU}_1} = \frac{|\langle \mathbf{h}_{m,m}, \mathbf{h}_{m,1} \rangle|^2}{\|\mathbf{h}_{m,m}\|^2} \quad (11)$$

연산대상 부 사용자들 간의 전송 용량을 비교하기 위해서 모든 m 번째 지원 부 사용자들은 오직 $\text{PU}_1\text{-Tx}$ 만이 간섭원으로 작용할 때의 SINR과 $C_{m,1}$ 값을 아래의 두 식을 통해 계산하는 것이 가능하다.

$$\text{SINR}_{m,1} = \frac{\|\mathbf{h}_{m,m}\|^2 P_2}{P_1 I_{\text{PU}_1} + N_0} \quad (12)$$

$$C_{m,1} = \log_2(1 + \text{SINR}_{m,1}) \quad (13)$$

$N > 1$ 인 경우에 m 번째 활성 부 사용자의 SINR은 식 (10)와 (11)을 사용하여 아래의 식과 같이 얻는다.

$$\text{SINR}_{\text{SU}_m} = \frac{\| \mathbf{h}_{m,m} \|^2 P_2}{P_1 I_{\text{PU}_1} + P_2 I_{\text{SU}_m}^{(N)} + N_0} \quad (14)$$

이에 상응하는 m 번째 활성 부 사용자의 전송 용량은 다음과 같다.

$$C_{\text{SU}_m} = \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{SU}_m}) \quad (15)$$

위의 과정을 통해서 주 사용자와 부 사용자의 총 전송 용량인 C_s 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$C_s = C_1 + \sum_{k=2}^{N+1} C_{\text{SU}_k} \quad (16)$$

제안한 알고리즘의 큰 흐름은 다음과 같다. 첫째, 모든 송수신 지점에서 초기화를 시킨다. 둘째, PU₁-Rx에서 연산대상 부 사용자들을 계산하고 알린다. 셋째, 각 연산대상 부 사용자의 수신기에서 (15)의 값을 계산하여 각 경우에 따라 PU₁-Rx나 융합센터로 송신한다. 마지막으로 PU₁-Rx나 융합센터에서 수신된 정보를 토대로 활성 부 사용자들을 선택하여 이를 알린 후 활성 부 사용자들이 전송을 시작한다.

활성 부 사용자를 선택하는 연산이 이루어지는 장소에 따라 다른 두 가지 경우의 알고리즘을 아래와 같이 제안하며, 표 1에 사용자 별로 주고받는 정보의 종류와 순서를 도식하였다. 표 1에서 1단계는 초기화 단계이므로 나타내지 않았으며, 경우1은 진한 글꼴, 경우2는 밑줄, 공통된 부분은 아무런 표시를 하지 않았고, 대시 '-' 기호는 어떤 신호도 송신하거나 수신하지 않음을 의미한다. 또한 회색의 빗살무늬로 칠해진 부분은 라이선스 주파수를 사용하여 통신을 하고 있음을 의미한다.

3.2.1 경우 1: PU₁-Rx에서 연산이 이루어 질 때

PU₁-Rx에서 식 (13)의 값을 수신한 뒤, 식 (7)을 만족시키며 $C_{m,1}$ 의 값이 큰 순서대로 부 사용자를 선택한다.

- (1) 1 단계: $\text{SINR}_{i,1}$, $\text{SINR}_{j,1}$, N , N_{PA} , SU_{PA} , 를 모든 지점에서 초기화 한다. 그 후 K , N_{max} 를 설정한다. N_{max} 는 허용되는 최대 활성 부 사용자의 개수를 의미한다.
- (2) 2 단계: 첫째, PU₁-Rx에서 모든 지원 부 사용자에 대해 식 (9)를 계산한다. 두 번째로 아래의 식을 기반으로 하여 최대 가능한 활

표 1. 알고리즘에서 사용자 간 주고받는 정보의 종류와 순서

Node	상태	2단계		3단계		4단계
PU ₁ -Tx	송신	파일럿 신호				
PU ₁ -Rx	송신	파일럿 신호	연산대상 알림 신호	-	-	활성화 SU 알림신호
	수신	모든 송신국 파일럿 신호			$\{C_{m,1}\}_{m=1}^{N_{\text{PA}}+1}$	
연산대상 이외의 SU-Tx	송신	파일럿 신호	-	-	-	-
	수신	자신과 PU의 파일럿 신호	-	-	-	-
연산대상 SU-Rx	송신	파일럿 신호	-	자신의 $C_{m,1}$	-	-
	수신	자신과 PU의 파일럿 신호	알림신호 수신	-	-	-
활성화 SU-Rx	송신	파일럿 신호	-	자신의 $C_{m,1}$	-	-
	수신	자신과 PU의 파일럿 신호	알림신호 수신	-	-	활성화 SU 알림신호
융합 센터	송신					활성화 SU 알림신호
	수신				$\{C_{m,1}\}_{m=1}^{N_{\text{PA}}+1}$	-

성 부 사용자의 범위를 계산한다.

$$N_{PA} = \underset{M}{\operatorname{argmax}} \left\{ \gamma_{thr}(\text{dB}) \geq 1 + \left(\beta_K^{(M)} - \beta_K^{(M - N_{\max})} \right) \frac{P_2}{N_0} \right\} \quad (17)$$

만약 $N_{PA} < N_{\max}$ 이면 N 은 N_{PA} 로 값이 설정된다. 그렇지 않다면 N 은 N_{\max} 로 설정된다. 최대 가능한 활성 부 사용자의 집합인 SU_{PA} 는 $\{SU_2, SU_3, \dots, SU_{N_{PA}+1}\}$ 로 구성되며 SU_{PA} 의 성분들은 연산대상 부 사용자들이다. PU_1 - Rx 가 피드백을 받아야 하는 부담을 줄이기 위해 N_{PA} 는 필요시 일정 수 이하로 제한될 수 있다. 세 번째로, PU_1 - Rx 는 소수의 연산대상 부 사용자들에게 해당 부 사용자가 연산대상 부 사용자임을 알린다.

- (3) 3 단계: 각 m 번째 연산대상 부 사용자들은 (13)의 식에 나와 있는 $C_{m,1}$ 을 계산한 뒤, 이 값을 PU_1 - Rx 로 피드백한다.
- (4) 4 단계: PU_1 - Rx 에서 연산대상 부 사용자의 수신기들로부터 $C_{m,1}$ 의 정보를 피드백 받은 뒤, N_{\max} 와 (7)의 식을 만족시키는 부 사용자들을 (6)의 식에 나와 있는 C_1 과 $C_{m,1}$ 의 값이 가장 큰 부 사용자들의 조합을 선택한다. 만약 값이 동일한 조합이 존재하는 경우에는 PU_1 - Rx 에 미치는 간섭이 적은 부 사용자를 우선적으로 선택한다. 활성 부 사용자를 선택한 뒤 PU_1 - Rx 는 해당 부 사용자가 활성 부 사용자임을 알리고, 활성 부 사용자는 전송을 시작한다.

3.2.2 경우 2: 융합 센터에서 연산이 이루어 질 때

PU_1 - Rx 에서 활성 부 사용자를 선택하는 것은 주 사용자의 전송 용량도 고려하는 방법이므로 가장 좋은 성능을 얻을 수 있다. 하지만, 실제 인지 무선 시스템에서는 주 사용자에게 가해지는 부담을 최소화 시켜야 함에도 불구하고 경우 1에서는 PU_1 - Rx 에서 피드백을 받아 연산을 수행하기 때문에 주 사용자가 수행해야 하는 연산이 늘어나 PU_1 - Rx 에 가해지는 부담이 커진다. 따라서 우리는 주 사용자의 부담을 기존의 OSO와 동일하게 유지하기 위해서 융합 센터에서 활성 부 사용자의 선택을 하는 경우의 알고리즘을 구성해 보았다. 동시에 좀 더 구현 가능한 알고리즘을 만들기 위하여 피드백 과정에서 전송되는 정보들을 양자화를 하였다. 경우 2의 제안

하는 알고리즘은 아래와 같다.

- (1) 1 단계: III. 2. 가. (1)과 동일.
- (2) 2 단계: III. 2. 가. (2)와 동일.
- (3) 3 단계: 각 m 번째 연산대상 부 사용자들은 (13)의 식을 통해 $C_{m,1}$ 을 계산한 뒤, 이 값을 융합 센터로 전송한다. 실제적인 경우를 고려하면, 협력 스펙트럼 감지 시스템에서 융합 센터에서 부 사용자와 주고받는 정보의 양은 매우 작기 때문에 융합 센터로 전송되는 정보 역시 매우 작은 bit를 가져야 하는데 정확한 값들을 전송하기 위해서는 매우 많은 bit 수가 필요하다. 따라서 우리는 실제 시스템을 고려하여 Lloyd-Max 양자화^[11] 방법을 이용해 $C_{m,1}$ 을 3-bit로 양자화(8개의 값으로 양자화)한 값을 융합 센터로 송신하는 방법을 제안한다. $N = 1$ 인 경우에 $C_{m,1}$ 을 양자화 하지 않았을 경우에 얻을 수 있는 전송 용량의 값 중에서 0인 경우들을 제외한 값들은 그림 2와 같이 가우시안 분포를 따른다. K 와 $\gamma_{thr}(\text{dB})$ 의 값에 따라 변하는 이 분포들을 Lloyd-Max 방식으로 양자화를 할 때 CDF (cumulative distribution function)로 사용한다. 이 방법은 경우 1에서 사용하더라도 주 사용자의 부담을 줄일 수 있어서 효과적이다. IV장에서 양자화를 한 것과 그렇지 않은 경우의 차이점을 모의실험을 통해 분석할 것이다.
- (4) 4 단계: 융합 센터에서 연산대상 부 사용자의 수신기들로부터 $C_{m,1}$ 의 값들을 수신한 뒤, N_{\max} 와 (7)의 식을 만족시키는 범위 내에

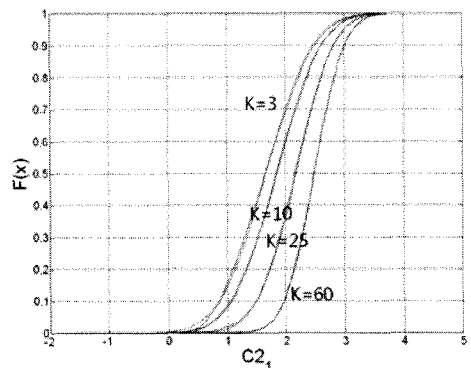


그림 2. $N = 1$ 일 때 활성 부 사용자의 전송 용량의 CDF ($K = 3, 10, 25, 60$)

서 $C_{m,1}$ 의 값이 큰 m 번째 부 사용자부터 차례대로 활성 부 사용자로 선택한다. 만약 $C_{m,1}$ 이 같은 부 사용자가 존재할 경우에, 경우 2의 알고리즘에서는 주 사용자에게 미치는 부 사용자의 간섭을 알 수 없기 때문에 임의로 선택한다. 활성 부 사용자를 선택한 뒤 융합 센터는 해당 부 사용자가 활성 부 사용자임을 알리고, 활성 부 사용자는 전송을 시작한다.

IV. 모의실험 결과 및 분석

본 장에서는 기존의 OSO 방법의 결과를 기준으로 하여 제안한 알고리즘의 성능을 검증한다. N_{max} , $\gamma_{thr}(dB)$, 양자화 여부, N_{PA} 의 제한 여부를 변수로 한 모의실험 결과들을 도시하고 이를 통해 제안한 알고리즘의 성능을 검증한다. 본 논문에서 사용한 모의실험 셋업은 다음과 같다. 수신 안테나 수는 4개, $P_1=P_2=1$ 이고 $(P_1/N_0)=(P_2/N_0)=1$ 이다.

모든 그래프에서 가로축은 지원 부 사용자의 수이다. 그림 3부터 그림 7과 그림 9의 세로축은 평

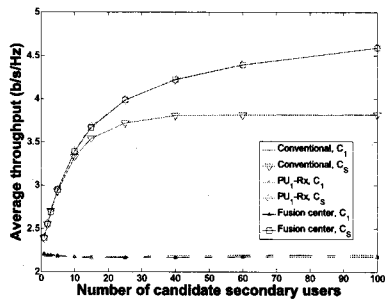


그림 3. 기존의 방법과 제안한 알고리즘의 성능 비교 ($N = 1, \gamma_{thr}(dB) = 0.5 dB$)

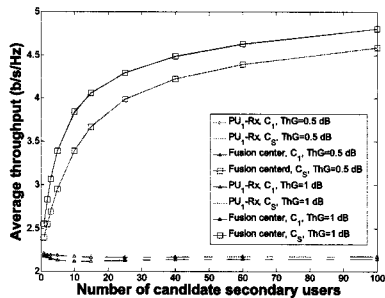


그림 4. $\gamma_{thr}(dB)$ 에 따른 성능 비교 ($N_{max} = 1, \gamma_{thr}(dB) = 0.5, 1 dB$)

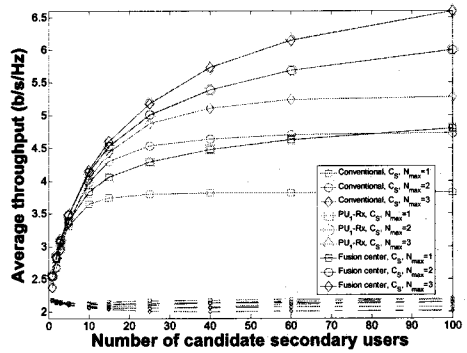


그림 5. N_{max} 에 따른 성능 비교 ($\gamma_{thr}(dB) = 1 dB$)

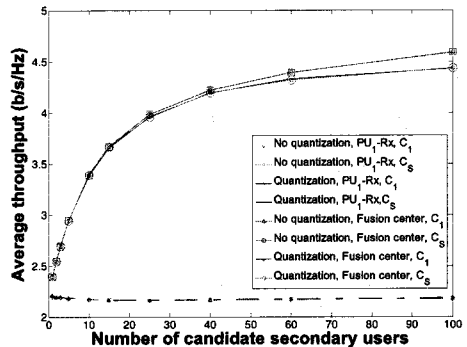


그림 6. 부 사용자와 융합 센터의 전송 방식에 따른 성능 비교 ($N_{max} = 1, \gamma_{thr}(dB) = 0.5 dB$)

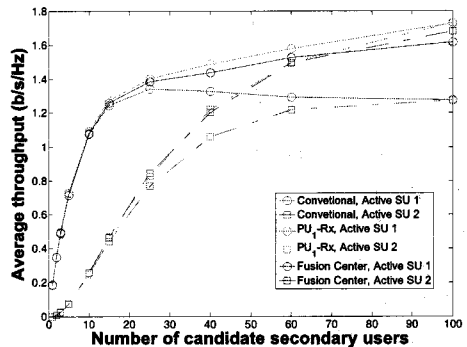


그림 7. 각 활성 부 사용자의 평균 전송 용량($N_{max} = 2, \gamma_{thr}(dB) = 0.5 dB$)

균 전송 용량이고, 그림 8의 세로축은 N_{PA} 의 수이다. 그림 3에서 그림 6과 그림 9에서 점선은 C_1 (주 사용자의 평균 전송 용량)이고, 실선은 C_2 (주 사용자와 부 사용자들의 평균 전송 용량의 합)를 나타낸다.

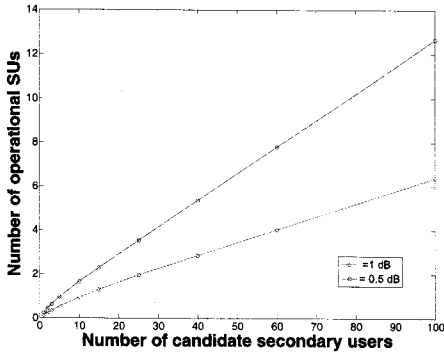


그림 8. N_{PA} 의 수 ($\gamma_{thr(dB)} = 0.5, 1dB$)

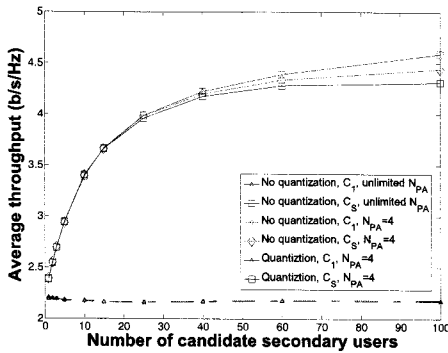


그림 9. 평균 전송 용량 ($N = 1, \gamma_{thr(dB)} = 0.5 dB$)

4.1 연산 위치에 따른 성능 차이 분석

본 절에서는 경우 1과 경우 2에서 양자화를 하지 않고 $\gamma_{thr(dB)} = 0.5dB$, $N_{max} = 1$ 일 때 제안된 알고리즘의 성능을 검증할 것이다. 그림 3에 기존의 OSO, PU₁-Rx에서 활성 부 사용자 선택이 이루어지는 경우 1, 융합 센터를 사용하는 경우 2의 세 가지 상황에 대해서 C_1 과 C_S 를 도시하였다. 적색 선은 기존 OSO, 녹색 선은 경우 1, 청색 선은 경우 2의 평균 전송 용량을 나타낸다. 경우 1이 경우 2보다 미세하게 좋은 성능을 보이지만 두 경우 모두 C_1 과 C_S 가 거의 같으며, C_1 이 기존의 OSO 곡선과 거의 동일하다. 따라서 인지 무선 시스템에서 제안한 알고리즘을 사용하는 OSO의 경우에는 주 사용자의 부담을 줄여주기 위하여 경우 2의 알고리즘을 사용하는 것이 더 실용적이며 높은 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

4.2 $\gamma_{thr(dB)}$ 차이에 따른 성능 분석

본 절에서는 $N_{max} = 1$ 이고 양자화를 하지 않았을 때, 경우 1과 경우 2에서 임계조건인 $\gamma_{thr(dB)}$ 이

0.5 dB와 1 dB일 때의 성능 차이를 분석한다. 그림 4에 모의실험을 통해 얻은 C_1 과 C_S 곡선들을 도시하였다. 적색 선과 흑색 선은 $\gamma_{thr(dB)} = 1dB$ 일 때 각각 경우 1과 경우 2의 평균 전송 용량이며, 다른 선의 색들은 그림 3과 동일하다. $\gamma_{thr(dB)}$ 값이 크면 모든 K 범위에서 더 높은 C_S 를 얻을 수 있다. $K = 100$ 일 때, $\gamma_{thr(dB)} = 0.5dB$ 는 20%, $\gamma_{thr(dB)} = 1dB$ 는 25% 정도의 평균 전송 용량 값의 상승률을 보인다. 하지만, $\gamma_{thr(dB)}$ 의 값이 1 dB인 경우에는 C_1 이 상대적으로 0.5 dB의 임계값을 갖는 결과보다 작은 값을 가지며 K 가 증가하더라도 기존의 OSO와 유사한 값으로 회복되지 않는다. 인지 무선 네트워크에서는 부 사용자의 존재 유무에 상관없이 주 사용자의 QoS를 보장해야 하므로, 높은 C_S 를 얻기 위해 무조건 큰 $\gamma_{thr(dB)}$ 값을 사용할 수 없으며 해당 K 에서 주 사용자의 QoS를 보장하는 $\gamma_{thr(dB)}$ 값을 선택하여야 한다.

4.3 N_{max} 차이에 따른 성능 분석

본 절에서는 N_{max} 의 값이 1, 2, 3 일 때 기존의 OSO 방법과 경우 1, 경우 2의 성능 차이를 분석한다. 그림 5에 $\gamma_{thr(dB)} = 1dB$ 일 때 N_{max} 에 따른 C_1 과 C_S 곡선들을 도시하였다. 적색 선은 기존의 방법, 녹색 선은 경우 1, 청색 선은 경우 2의 평균 전송 용량이다. 실선은 C_S 의 곡선들이고 점선은 C_1 의 곡선들이다. 그리고 네모는 $N_{max} = 1$, 동그라미는 $N_{max} = 2$, 다이아몬드 모양은 $N_{max} = 3$ 일 때의 평균 전송 용량을 나타낸다. 그림 3과 마찬가지로 경우 1과 경우 2의 성능 차이는 거의 없으며 $K = 100$ 인 지점을 기준으로 $N_{max} = 1, 2, 3$ 에서 각각 25.51%, 26.87%, 24.93% 정도 C_S 가 기존의 방법에 비해 상승하였다. 기존의 OSO 방법 역시 N_{max} 가 큰 경우에는 C_1 이 점점 감소한다^[8]. 제안한 알고리즘의 C_1 이 기존의 OSO만큼의 성능을 보이며, C_S 는 더욱 향상시켰으므로 본 논문의 알고리즘이 기존의 OSO 성능을 개선하였다고 할 수 있다.

4.4 양자화 여부에 따른 성능 분석

그림 6은 연산대상 부 사용자들의 수신기에서 전송되는 $C_{m,1}$ 의 값을 양자화 한 것과 그렇지 않은 상황에서 경우 1과 경우 2의 C_1 과 C_S 를 나타낸 곡선들이다. 적색과 흑색은 양자화를 한 곡선들이며 청색과 초록색은 양자화를 하지 않은 곡선들이다.

실선은 C_S , 점선은 C_1 을 나타낸다. 양자화를 한 경우는 양자화를 하지 않은 것보다 $K = 40$ 이상에서 상대적으로 작은 값을 가진다. 여기서 생기는 손실은 양자화로 인해 작은 차이의 $C_{m,1}$ 들이 같은 값으로 취급되어, 더 큰 $C_{m,1}$ 을 가지는 부 사용자가 선택되지 못함으로써 발생한다. K 가 커지면 작은 차이의 $C_{m,1}$ 들이 더 많이 존재하게 되어서 성능의 저하가 더 커지게 되는 것을 확인할 수 있다. 실제 환경에서 K 는 정보 교환과 연산 속도의 제약으로 인해 매우 큰 값을 가지는 것이 불가능하므로 양자화는 실제로 시스템을 구현하는 경우에는 성능 저하에 큰 영향을 미치지 않을 것이며, 더 효율적이고 빠르게 활성 부 사용자를 선택할 수 있게 할 것이다.

4.5 제안한 알고리즘의 사용자 간 공평성 분석

본 절에서는 제안한 알고리즘을 통해 각 사용자들에게 공평한 통신이 보장되는 지 검증한다. $N_{max} = 2$ 이고 $\gamma_{thr(dB)} = 0.5$ dB인 경우에 각 활성 사용자들의 평균 전송 용량을 그림 7에 도시하였다. 활성 부 사용자 2의 경우 K 가 작은 경우에는 임계 조건에 의해서 라이선스 밴드 사용을 허가 받지 못하는 경우가 많으므로 활성 부 사용자 1보다 평균 전송 용량이 낮다. 하지만 K 가 커질수록 연산 대상 부 사용자의 수가 커져서 두 값이 거의 같아진다. 기존의 OSO는 K 가 증가하면서 활성 부 사용자 1의 평균 전송 용량이 하강하는 형태를 가지지만 제안한 알고리즘은 두 활성 부 사용자의 평균 전송용량이 꾸준히 증가하면서 각 사용자들이 더 많은 정보를 전송할 수 있게 해 준다. 특히 활성 부 사용자 2의 경우는 전 범위의 K 에서 기존의 방법보다 높은 평균 전송 용량을 확보할 수 있으므로 더 공평한 인지 무선 통신이라 할 수 있다.

4.6 N_{PA} 에 따른 성능 분석

본 절에서는 융합 센터를 사용하는 알고리즘에서 N_{PA} (연산 대상 부 사용자의 수)에 제한을 두었을 때와 제한을 두지 않았을 때의 성능을 비교하여 분석한다. 그림 8에 $\gamma_{thr(dB)} = 0.5, 1$ dB일 때 K 에 따른 N_{PA} 의 수를 나타내었다. 임계값의 조건이 느슨한 경우 N_{PA} 의 수가 동일한 K 에서 더 많음을 알 수 있다. 이 차이가 앞의 절에서 임계값이 느슨한 경우 더 높은 평균 전송 용량을 가지는 원인이 된다. 융합센터와 통신하는 부 사용자의 수를 줄이기 위해,

정해진 K 에서 $\gamma_{thr(dB)}$ 를 기준으로 하여 N_{PA} 를 그림 8의 곡선이 나타내는 값으로 제한하여도 일정 수준의 K 까지는 제한하지 않는 결과와 유사한 성능을 낼 수 있다. 이를 검증하기 위해서 $N_{max} = 1$, $\gamma_{thr(dB)} = 0.5$ dB일 때 경우 2의 알고리즘의 C_1 과 C_S 곡선들을 N_{PA} 의 제한여부에 따라 그림 9에 도시하였다. 청색 선은 양자화와 N_{PA} 제한을 모두 다 안 했을 경우, 적색 선은 N_{PA} 만 4로 제한한 경우, 흑색 선은 양자화를 하고 N_{PA} 도 4로 제한한 경우이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 $\gamma_{thr(dB)} = 0.5$ dB에서 $K = 40$ 까지는 N_{PA} 의 값이 4보다 작기 때문에 40 이하의 K 에서는 세 가지 경우의 곡선들은 거의 동일한 성능을 보인다. 하지만 $K > 40$ 인 영역에서는 N_{PA} 를 제한한 경우와 그렇지 않은 경우에 $C_{m,1}$ 을 비교할 수 있는 부 사용자의 수에 차이가 K 가 커질수록 점점 커져서 C_S 의 값이 $K = 100$ 인 지점에서 최대 8% 정도의 차이를 보이게 된다. N_{PA} 는 융합 센터가 송수신해야 하는 부 사용자의 수로서 이 값이 크면 융합 센터에서 수신하고 처리해야 할 연산량이 늘어나서 활성 부 사용자를 선택하는 데 있어서 시간이 더 걸리며 시스템이 더 복잡해진다. 실제 상황에서는 채널의 coherence 시간이 짧을 경우에 알고리즘이 수행되는 동안 채널 상태가 변화할 수 있으므로 가능한 한 알고리즘의 연산 속도를 빠르게 해야 한다. 따라서 K 와 $\gamma_{thr(dB)}$ 에 따라 양자화와 N_{PA} 제한이라는 두 가지 방법을 사용하여 좀 더 실제 시스템에 부합하며 효율적인 알고리즘을 구현할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서 우리는 인지 무선 네트워크에서 기존의 SIMO OSO의 성능을 개선하는 활성 부 사용자 알고리즘을 제안하고 모의실험을 통해 성능을 검증한다. 기존의 OSO에서는 단순히 주 사용자만 오는 간섭이 적은 부 사용자들부터 차례대로 활성 부 사용자로 선택한다. 이로 인해 선택된 활성 부 사용자 중에서 주 사용자의 송신기에서 오는 신호로 인해 간섭을 심하게 받아 작은 전송 용량만을 가지는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 기존의 OSO에서 언급되지 않았던 주 사용자로부터 부 사용자로 가는 간섭을 고려하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 주 사용자의 전송 전략을 수정

하지 않고 가장 높은 전송 용량을 가지는 부 사용자를 주 사용자의 수신기나 융합 센터에서 선택함으로써 활성 부 사용자의 평균 전송 용량을 증가시킨다. 실제 환경에서 시스템을 구현하는 경우에는 주 사용자의 부담이 추가되어서는 안 되며 K 의 값이 작아야 한다. 주 사용자의 수신기나 융합 센터에서 선택이 이루어지는 두 경우에 전송 용량이 큰 차이를 보이지 않고, 양자화를 하여도 작은 K 에서는 성능에 영향을 미치지 않기 때문에 본 논문에서 제안한 알고리즘은 이상적인 경우 뿐 아니라 실질적인 환경에서도 기존의 OSO 방법에 비하여 성능 향상이 있다.

참고 문헌

[1] Federal Communications Commission, "Spectrum policy task force report, FCC 02-155," Nov., 2002.

[2] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, Vol.23, No.2, pp.201- 220, Feb. 2005.

[3] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and the degrees of freedom for the K user interference channel," *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol.54, No.8, pp.3425-3441, Aug., 2008.

[4] S. M. Perlaza, Fawaz, Nadia Fwaz, Samson Lasaulce and Merouane Debbah, "From Spectrum Pooling to Space Pooling: Opportunistic Interference Alignment in MIMO Cognitive Networks," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.58, No.7, pp.3728-3741, July, 2010.

[5] K. Hamdi, W. Zhang, and K. B. Letaief, "Joint beamforming and scheduling in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Nov., 2007, pp.2977-2981.

[6] R. Zhang and Y.-C. Liang, Exploiting new forms of multiuser diversity for spectrum sharing in cognitive radio networks Sep. 2008 [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/0809.2147>

[7] T. W. Ban, W. Choi, B. C. Jung, and D. K. Sung, "Multi-user diversity in a spectrum sharing system," *IEEE Trans. Wireless*

Communication., Vol.8, No.1, pp.102-106, Jan., 2009.

[8] Cong Shen and Michael P. Fitz, "Opportunistic Spatial Orthogonalization and Its Application in Fading Cognitive Radio Networks," *IEEE J. Selected Topics in Signal Processing*, Vol.5, No.1, pp.182-189, Feb., 2011.

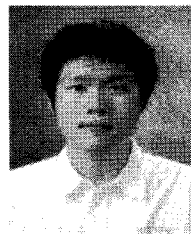
[9] Mohammad G. Khoshkholgh, Keivan Navaie and Halim Yanikomeroglu, "Access Strategies for Spectrum Sharing in Fading Environment: Overlay, Underlay, and Mixd," *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.9, No.12, pp.1780-1793, Dec., 2010.

[10] O. Simeone and U. Spagnolini, "Channel estimation for block-fading frequency-selective Rayleigh MIMO channels: performance limits," in *Proceedings in Vehicular Technology Conference 2004-spring*, Vol.2, pp.856-860, 2004.

[11] John G. Proakis, *Digital Communications 4th ed.*, McGraw-Hill, 2001.

유강현 (Kang-Hyun Yoo)

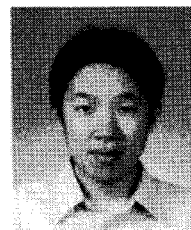
준회원



2009년 2월 연세대학교 전기 전자 공학부 학사
2010년 2월~현재 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 석사과정
<관심분야> Cognitive Radio Network, 무선 네트워크, 레이다

김용화 (Yong-Hwa Kim)

정회원



2001년 2월 서울대학교 전기공학부 학사
2007년 2월 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 박사
2007년~2011년 한국전기연구원
2011년~현재 목포해양대학교 해양전자통신공학부

<관심분야> 통신 시스템 설계, 통신 신호처리, 스마트 그리드

이 한 별 (Han-Byul Lee)

정회원



2007년 2월 경북대학교 전자전
기컴퓨터학부 학사
2009년 8월 서울대학교 전기컴
퓨터공학부 석사
2009년 9월~현재 서울대학교
전기 컴퓨터공학부 박사과정
<관심분야> 무선채널모델링,
Cognitive radio network, 통
신 시스템

김 성 철 (Seong-cheol Kim)

종신회원



1984년 2월 서울대학교 전기공
학과 학사
1987년 2월 서울대학교 전기공
학부 석사
1995년 2월 미국 폴리테크닉대
학교 박사
1995년~1999년 AT&T Bell
Lab. Member of Technical Staff
1999년~2003년 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 조
교수
2003년~2008년 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 부
교수
2009년~현재 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 정교수
<관심분야> Wireless Communication System,
Channel modeling, Communication Algorithm,
MIMO, Relay, Localization