

인지 라디오 시스템에서의 능동적인 간섭 관리 기법

서종필*, 양참솔*, 박건우*, 정재학°

An Active Interference Management Scheme for Cognitive Radio Systems

Jongpil Seo*, Chamsol Yang*, Gunwoo Park*, Jaehak Chung°

요약

인지 라디오 시스템은 1차 시스템이 사용 중인 주파수를 공유함으로써 지역 당 주파수 이용효율을 향상시킬 수 있는 중요한 기술로 인식되고 있다. 본 논문에서는 2차 시스템이 1차 시스템에 간섭을 미치지 않으며 주파수를 공유할 수 있는 보다 능동적인 간섭 관리 기법을 제안한다. 제안된 프로토콜을 통해 2차 사용자는 1차 시스템의 간섭 채널 정보 및 송·수신 필터 정보를 획득하고 이를 이용하여 프리코딩 행렬을 계산한다. 이때 2차 시스템으로부터의 간섭은 1차 시스템의 사용되지 않는 부채널로 모이기 때문에 1차 시스템은 추가적인 연산 없이 자동적으로 간섭을 제거한다. 그리고 2차 시스템은 백색화 정합 필터를 통해 1차 시스템으로부터의 간섭을 제거함으로써 스펙트럼 효율을 향상시킨다. 전산모의실험을 통해 제안된 기법이 1차 시스템에 간섭을 미치지 않는 동시에 2차 시스템의 성능을 향상시키고, 2차 시스템의 수가 증가하더라도 1차 시스템의 성능이 저하되지 않음을 보였다.

Key Words : cognitive radio, interference management, uplink system.

ABSTRACT

Cognitive radio systems have been considered as a strong solution of frequency scarcity due to the limit of frequency resources. This paper proposed an active interference management scheme that the secondary system can coexist with the primary system in the same frequency band without interference. Using the proposed protocol, the secondary user acquires interference channel information and transmit/receive filter information and designs precoding matrix using these information. Since interference from the secondary systems are collected to unused subchannels of the primary system, the primary system can suppress interference without additional process. The secondary systems suppress interference from the primary system using whitening matched filter so that the spectral efficiency can be improved. Numerical results provides that the proposed scheme improves performance of the secondary systems without interference to the primary system and do not degrade performance of the primary system even if the number of the secondary systems increases.

I. 서론

스마트폰과 태블릿 PC 등의 무선 기기 사용량이

증가하면서 무선 통신 시스템에서 처리해야 하는 데이터 요구량이 폭발적으로 증가하고 있다. 무선 데이터 전송 효율 향상을 위해서는 주파수 당 전송

※ 본 연구는 미래부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음.

※ 본 연구는 인하대학교의 지원을 받아 수행된 연구임.

♦ First Author : 인하대학교 전자공학과, slavik@nate.com, 정회원

° Corresponding Author : 인하대학교 전자공학과, jchung@inha.ac.kr, 중신회원

* 인하대학교 전자공학과, naballa@naver.com, gungnir00@nate.com.

논문번호 : KICS2013-07-301, 접수일자 : 2013년 7월 23일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 27일

효율이 높은 무선 통신 시스템의 개발이 요구된다. 이를 위해 다중 안테나 (MIMO) 시스템과 효율적인 스케줄링 등 다양한 무선 통신 기술이 개발되어 왔으며 일부의 주요 기술들이 LTE (Long Term Evolution) / LTE-A 등의 무선 통신 표준 기술로 채택되고 있다.

고품질의 영상 데이터, 네트워크 게임 등과 같은 대용량의 데이터를 사용하기 위한 사용자의 요구는 현재 상용화된 무선 전송 시스템의 한계를 초과하고 있다. 이러한 수요를 만족하기 위해 고도의 전송 기술을 가진 새로운 무선 통신 시스템이 구축되어야 하나 이를 위해서는 새로운 주파수 대역을 발굴해야 한다. 하지만 현재 사용 가능한 대부분의 주파수 대역은 이미 용도 및 지역별로 주파수 할당이 되어 있기 때문에 새로운 무선 통신 시스템을 위한 새로운 주파수 대역을 발굴하기 쉽지 않는 상황이다^{1,2}.

인지 라디오 (Cognitive Ratio: CR) 시스템은 이러한 주파수 부족 현상을 극복하기 위한 방법으로 제안되었다³. 인지 라디오 시스템은 특정 주파수 대역의 사용권이 있는 면허권자 또는 1차 사용자가 해당 주파수를 시간 또는 지역적으로 사용하지 않을 때 이를 센싱하고 사용 여부를 결정하는 새로운 통신 방법이다. 현재 이를 이용하여 수백 미터 이내의 근거리 통신용인 IEEE 802.11af와 수십 킬로미터 이내의 중장거리 통신용인 IEEE 802.22가 국제 표준화되어 있다^{4,5}.

인지 라디오 시스템의 주요 기술 중 하나는 주파수 사용권을 가진 면허권자 혹은 1차 사용자가 해당 주파수 대역을 사용하지 않을 때를 인지하는 스펙트럼 센싱 기술이다. 이를 통해 1차 시스템의 주파수 사용 여부를 짧은 시간 내에 인지하고, 다른 주파수 대역으로 옮겨 통신을 재개하는 것이 가능하다. 또한 Geolocation DB를 통해 지역별로 할당되어 있는 주파수 할당 정보를 공유함으로써 인접 채널 간 간섭을 최소화할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 지역별로 실제 주파수 이용효율이 낮은 지역에서 효과적이다. 우리나라와 같이 국토 면적이 좁고 지역별로 대부분의 주파수가 할당되어 있는 경우에는 Geolocation DB와 스펙트럼 센싱을 통한 유휴 대역 탐색이 쉽지 않다. 이 경우 인지 라디오 시스템에 할당할 수 있는 주파수 대역이 부족하기 때문에 해당 지역에서는 할당되어 있지 않으나 바로 인접한 지역의 1차 시스템에 할당된 주파수를 사용해야 하는 경우가 발생할 수 있다. 특히 우리나라

라는 산지와 고층 건물이 많기 때문에 전계 강도가 고르게 분포되지 않는 지역이 많다. 이때 1차 시스템과 인지 라디오 시스템의 서비스 커버리지가 중첩되어 인지 라디오 시스템이 1차 시스템에 간섭을 미치게 되어 스펙트럼 효율을 저하시킨다. 이를 개선하기 위해서 인지 라디오 시스템에 의한 간섭 관리 기법이 고려되어야 한다.

인지 라디오 시스템 또는 2차 시스템이 1차 시스템에 미치는 간섭을 관리하는 기법으로서 간섭 정렬 (Interference alignment)⁶ 또는 LTE-A의 협력 빔포밍 (Coordinated beamforming), 다중 지점 협력 전송 (Coordinated multipoint transmission/reception)⁷과 같은 능동적인 간섭 관리 기법은 적용이 용이하지 않다. 이들 기법은 기지국과 단말기 등 각 노드에서 간섭 채널의 정보를 모두 알고 있어야 적용이 가능하다. 그러나 1차 시스템은 2차 시스템에 대한 정보를 인지할 의무가 없으며 오히려 2차 시스템의 간섭으로부터 보호받아야 하기 때문에 이와 같은 능동적인 간섭 관리 기법은 인지 라디오 시스템에 적합하지 않다. 인지 라디오 시스템에 보다 적합한 간섭 관리 기술로서 직교 빔포밍을 고려할 수 있다⁸. 직교 빔포밍은 2차 시스템이 1차 시스템에 미치는 간섭을 널링(nulling)하기 위해서 1차 시스템으로의 간섭 채널과 직교하는 안테나 가중치를 사용한다. 이 기법은 2차 시스템이 1차 시스템에 미치는 간섭의 영향을 제거하지만 1차 시스템이 2차 시스템에 미치는 간섭은 고려하지 않기 때문에 2차 시스템의 성능이 크게 저하될 수 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 상향링크 통신 시 1차 시스템과 2차 시스템 간의 간섭 관리 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 직교 빔포밍 보다 능동적인 방법으로써 1차 시스템의 MIMO 채널 중 할당하지 않은 부채널을 2차 시스템으로부터의 간섭을 제거하는 데 사용한다. 2차 사용자는 간섭이 1차 시스템의 사용되지 않는 부채널로 모아지도록 프리코딩 행렬을 계산하고 2차 기지국은 1차 시스템으로부터의 간섭을 제거하기 위해 백색화 정합 필터를 사용한다. 이때 2차 사용자는 간섭 채널 정보와 사용되지 않는 부채널 정보를 필요로 한다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 2차 사용자가 1차 기지국에 랜덤 액세스 후 1차 기지국이 훈련신호 및 부채널 정보를 전송하는 프로토콜을 추가적으로 제안한다. 제안하는 방법에서 1차 시스템과 주파수 대역을 공유하는 2차 시스템의 수가 증가하더라도 1차 시스템의 성능은 전혀 저하되지

않는다. 또한 2차 시스템은 1차 시스템으로부터의 간섭을 제거하기 때문에 2차 시스템의 성능 또한 향상되어 전체적인 스펙트럼 효율이 향상된다. 전산 모의실험을 통해 제안된 간섭 관리 기법의 채널 용량 성능을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II에서는 시스템 모델을 보이고 III에서는 간섭 관리를 위한 전송 프로토콜과 이에 상응하는 프리코딩 및 간섭 제거 기법을 제안한다. IV에서는 전산모의실험을 통해 제안된 방법의 우수성을 보이고 마지막으로 V에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 일차 시스템과 하나 또는 그 이상의 2차 시스템이 존재하는 상향링크 인지 라디오 시스템을 고려한다. 1차 시스템과 2차 시스템은 각각 하나의 기지국과 하나 또는 그 이상의 사용자가 존재하며 각 기지국은 한 시간 슬롯 당 한 사용자와 통신한다고 가정한다. 1차 사용자와 1차 기지국은 각각 M_P 개의 송신 안테나와 N_P 개의 수신 안테나를 가지며, 2차 시스템 k 의 사용자와 기지국은 각각 M_{S_k} 개의 송신 안테나와 N_{S_k} 개의 수신 안테나를 갖는다. 1차 사용자와 2차 사용자는 각각 한 시간 슬롯 당 최대 $d_P \leq \min(M_P, N_P)$ 와 $d_{S_k} \leq \min(M_{S_k}, N_{S_k})$ 개의 공간 심볼을 전송한다. 이때 1차 시스템과 2차 시스템 k 의 기지국에서의 수신 신호 \mathbf{y}_P 와 \mathbf{y}_{S_k} 는 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_P = \mathbf{G}_P^H \left[\mathbf{H}_{PP} \mathbf{F}_P \mathbf{x}_P + \sum_k \sqrt{\alpha_{PS_k}} \mathbf{H}_{PS_k} \mathbf{F}_{S_k} \mathbf{x}_{S_k} + \mathbf{n}_P \right], \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_{S_k} = \mathbf{G}_{S_k}^H \left[\mathbf{H}_{S_k S_k} \mathbf{F}_{S_k} \mathbf{x}_{S_k} + \sqrt{\alpha_{S_k P}} \mathbf{H}_{S_k P} \mathbf{F}_P \mathbf{x}_P + \sum_{j \neq k} \sqrt{\alpha_{S_k S_j}} \mathbf{H}_{S_k S_j} \mathbf{F}_{S_j} \mathbf{x}_{S_j} + \mathbf{n}_{S_k} \right]. \quad (2)$$

여기서 \mathbf{H} 는 채널 행렬을 의미하며 왼쪽 아래첨자는 수신단, 오른쪽 아래첨자는 송신단을 지시한다. \mathbf{F} 와 \mathbf{x} 는 각각 사용자의 프리코딩 행렬과 송신 심볼 벡터를 의미하며 송신 심볼은 전력 제한 조건 $E\{\|\mathbf{x}\|^2\} = P$ 를 만족해야 한다. \mathbf{n} 은 부가 가우시안 잡음 벡터이며 평균이 영벡터이고 공분산 행렬

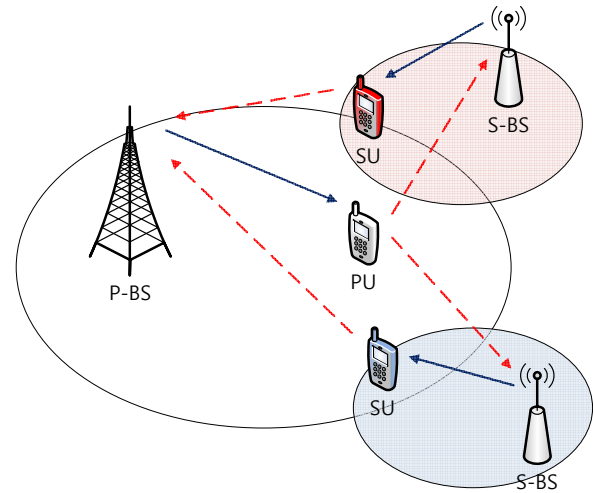


그림 1. 인지 라디오 시스템 모델
Fig. 1. System model.

은 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 이다. α 는 송신기와 수신기 사이의 상대적 경로 손실을 의미하며 원하는 신호에 대한 경로 손실은 $\alpha_{PP} = \alpha_{S_k S_k} = 1$ 로 가정한다. 간섭 제거 행렬은 \mathbf{G} 로 나타낸다.

III. 인지 라디오 시스템에서의 간섭 관리 기법

본 절에서는 인지 라디오 시스템에서 상향링크 통신 시 2차 사용자가 1차 기지국에 미치는 간섭을 관리하는 기법을 제안한다. 일반적으로 인지 라디오 시스템은 DB를 통해 1차 시스템의 지역적인 주파수 대역 할당을 파악 후 스펙트럼 센싱을 통해 해당 지역에서 사용되지 않는 대역을 탐색하여 사용되지 않는 대역에서 서비스를 개시한다. 그러나 우리나라와 같이 국토 면적이 좁은 국가에서는 지역적으로 대부분의 주파수가 할당되어 있기 때문에 비어있는 대역을 찾기가 쉽지 않다. 인지 라디오 시스템으로 활용할 수 있는 대역이 적기 때문에 해당 지역에서는 할당되어 있지 않은 인접 지역의 1차 시스템에 할당된 주파수를 사용해야 하는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 상황에서 추가적으로 산지나 고층 건물로 인해 전계 강도 분포가 고르지 않은 지역에서는 1차 시스템과 2차 시스템의 커버리지가 중첩되어 2차 시스템이 1차 시스템에 간섭을 미치게 된다. 효율적인 간섭 관리를 위해 협력 빔포밍, 간섭 정렬 또는 다중 지점 협력 전송 등과 같은 기술을 고려할 수 있으나 이들 기술은 간섭 링크의 채널 정보 획득 문제로 인해 적합하지 않다. 1차 시스템 간 간섭 상황과 같이 동일 시스템 내에서는 피드백 및 백홀 간 통신에 의해 간섭 링크 채

널 정보 교환이 가능하다. 1차 시스템과 2차 시스템은 서로 완전히 분리되어 있기 때문에 간섭 링크 채널 정보 획득이 용이하지 않다. 따라서 1차 시스템에 작용하는 오버헤드를 최소화하는 훈련신호 전송 프로토콜과 후속 간섭 관리 기술이 필요하다. 본 절에서는 1차 시스템과 2차 시스템 간의 간섭 채널 정보 획득을 위한 훈련신호 전송 프로토콜과 이를 통한 간섭 관리 기법을 제안한다.

3.1. 훈련신호 전송 프로토콜

본 부절에서는 1차 시스템과 2차 시스템 간의 간섭 채널 정보 획득을 위한 훈련신호 전송 프로토콜을 제안한다. 일반적인 간섭 관리 기법은 제한적 또는 완전한 협력을 통해 전체 시스템을 하나의 가상 시스템으로 통합하는 효과를 갖는다. 반면 인지 라디오 환경에서 1차 시스템과 2차 시스템은 서로 완전히 분리되어 있기 때문에 하나의 가상 시스템으로 통합하는 것이 불가능하다. 기존의 1차 시스템은 인접한 2차 시스템의 존재 유무를 확인하지 않는다. 이로 인해 동일한 대역을 사용하는 2차 시스템이 간섭을 미치더라도 기존의 통신 방법을 유지하기 때문에 간섭으로 인한 성능 열화가 발생한다. 따라서 효율적인 간섭 관리를 위해 간섭 채널 정보 획득을 위한 훈련신호 전송 프로토콜이 필요하다.

본 논문에서 2차 시스템은 1차 시스템의 전송 방법, 프레임 구조 등을 사전에 인지하고 있다고 가정한다. 그리고 1차 시스템과 2차 시스템은 모두 TDD(Time Division Duplexing) 방식을 사용한다고 가정한다. 제안하는 훈련신호 전송 프로토콜은 다음과 같다. 2차 사용자는 2차 기지국으로 상향링크 통신을 하기에 앞서 1차 기지국으로 랜덤 액세스한다. 이를 통해 1차 기지국은 2차 시스템의 존재를 파악하게 된다. 1차 기지국은 2차 시스템으로 인한 영향을 최소화하기 위해 하향링크 시 프레임의 헤더 부분에 송·수신 행렬 정보 등과 같은 1차 사용자와의 통신 시 사용되는 신호처리 정보를 삽입하여 전송한다. 2차 사용자는 1차 사용자의 상향링크 프레임에 삽입되어 있는 훈련신호를 통해 간섭 채널을 추정하여 간섭 채널 정보를 획득하고 1차 시스템과 동기화를 이룬다. 그리고 1차 시스템에 간섭을 미치지 않기 위해 간섭 채널 정보와 1차 시스템의 송·수신 필터 정보를 이용하여 프리코딩 행렬을 계산한 후 2차 기지국으로의 상향링크 통신을 시작한다.

3.2. 간섭 관리를 위한 프리코딩 행렬 계산

본 부절에서는 위에서 제안한 프로토콜을 기반으로 2차 시스템의 간섭을 제어하는 프리코딩 기법을 제안한다. 2차 사용자는 제안된 프로토콜을 통해 채널 정보 및 송·수신 행렬 정보를 획득한 후 1차 시스템에 간섭을 미치지 않기 위한 프리코딩 행렬을 계산한다. 이때 1차 시스템은 2차 사용자로부터의 간섭 채널 상태에 관계없이 1차 시스템 간의 채널 H_{PP} 만을 이용해서 프리코딩 행렬 및 간섭 제거 행렬을 계산한다.

일반적인 SU-MIMO 시스템에서, 특이값 분해(Singular Value Decomposition: SVD)를 통해 평형 등가 부채널로 채널 행렬을 분해 후 water-filling을 이용한 전력 할당 기법이 채널 용량 측면에서 최적이다[9]. 또는 전체 평형 등가 부채널 중에서 최대 특이값에 해당하는 부채널에만 전력을 할당함으로써 전체 다이버시티 이득과 배열 이득을 얻는 eigenmode 빔포밍 기법을 고려할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 프리코딩 방법은 1차 시스템에 주어진 전체 부채널 중 일부를 할당하고 나머지 부채널에는 신호 공간에는 2차 사용자로부터의 간섭을 수신하도록 하는 방법을 고려한다.

1차 시스템의 채널 행렬의 특이값 분해는 다음과 같이 주어진다.

$$H_{PP} = U\Sigma V^H, \quad (3)$$

$$U = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_{N_p}], \quad (4)$$

$$V = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_{M_p}], \quad (5)$$

$$\Sigma = \text{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{\min(M_p, N_p)}\}. \quad (6)$$

여기서 \mathbf{u}_i 와 \mathbf{v}_i 는 각각 좌 특이벡터와 우 특이벡터를 의미하며 특이값은 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{\min(M_p, N_p)}$ 의 크기 순서를 갖는다. 이때 1차 사용자의 프리코딩 행렬 \mathbf{F}_P 와 간섭 제거 행렬 \mathbf{G}_P 는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{F}_P = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_{d_p}], \quad (7)$$

$$\mathbf{G}_P = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_{d_p}]. \quad (8)$$

식 (7)과 (8)에서 보이는 바와 같이 1차 시스템의 프리코딩 행렬 1차 \mathbf{F}_P 와 간섭 제거 행렬 \mathbf{G}_P 를 계산할 때 2차 사용자로부터의 간섭 채널 H_{PS} 는 고려하지 않는다. 1차 시스템은 2차 사용자로부터의

간섭을 제거하기 위해 주어진 $\min(M_P, N_P)$ 개의 부채널을 모두 할당하지 않는다. 1차 시스템이 할당하는 부채널의 개수(또는 공간 심볼 개수) d_P 는 다음과 같이 제한된다.

$$d_P \leq \min(M_P, N_P) - \max_k d_{S_k}. \quad (9)$$

1차 기지국은 \mathbf{G}_1 을 이용하여 1차 사용자의 상향 링크 신호를 추출한다. 2차 사용자의 간섭을 제거하기 위해서, 2차 사용자의 간섭 신호는 1차 사용자가 할당하지 않는 나머지 부채널로 수신되어야 한다. 따라서 2차 사용자의 프리코딩 행렬은 다음과 같이 계산한다.

$$\mathbf{F}_{S_k} = \frac{(\mathbf{H}_{PS_k})^+ [\mathbf{u}_{N_P-d_{S_k}+1}, \mathbf{u}_{N_P-d_{S_k}+2}, \dots, \mathbf{u}_{N_P}]}{\|(\mathbf{H}_{PS_k})^+ [\mathbf{u}_{N_P-d_{S_k}+1}, \mathbf{u}_{N_P-d_{S_k}+2}, \dots, \mathbf{u}_{N_P}]\|_F}. \quad (10)$$

여기서 $(\cdot)^+$ 는 의사 역행렬을 의미한다. 그리고 $[\mathbf{u}_{N_P-d_{S_k}+1}, \mathbf{u}_{N_P-d_{S_k}+2}, \dots, \mathbf{u}_{N_P}]$ 는 1차 기지국이 사용하지 않는 부채널을 의미하며 식 (4)의 행렬 \mathbf{U} 에서 식 (8)의 \mathbf{G}_P 의 열벡터들을 제외한 나머지 d_{S_k} 개의 열벡터로 이루어진 행렬이다. 식 (10)의 d_{S_k} 는 2차 사용자가 송신하는 공간 심볼의 개수를 의미하며 다음과 같은 제한 조건을 갖는다.

$$d_{S_k} \leq \min\{\min(M_P, N_P) - d_P, \min(M_{S_k}, N_{S_k})\}. \quad (11)$$

2차 기지국은 1차 시스템으로부터의 간섭을 최소화하기 위해 백색화 정합 필터(whitening matched filter)를 이용하여 2차 사용자의 상향링크 신호를 검출한다.

$$\mathbf{G}_{S_k} = \frac{\mathbf{W}_{S_k}^{-1} \mathbf{H}_{S_k S_k} \mathbf{F}_{S_k}}{\|\mathbf{W}_{S_k}^{-1} \mathbf{H}_{S_k S_k} \mathbf{F}_{S_k}\|_F}. \quad (12)$$

여기서 \mathbf{W}_{S_k} 는 2차 기지국 k 의 간섭 잡음 공분산 행렬이며 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{W}_{S_k} = \alpha_{S_k P} \mathbf{H}_{S_k P} \mathbf{F}_P \mathbf{F}_P^H \mathbf{H}_{S_k P}^H + \sum_{j \neq k} \alpha_{S_k S_j} \mathbf{H}_{S_k S_j} \mathbf{F}_{S_j} \mathbf{F}_{S_j}^H \mathbf{H}_{S_k S_j}^H + \sigma^2 \mathbf{I}. \quad (13)$$

식 (13)의 간섭 잡음 공분산 행렬 \mathbf{W}_{S_k} 에서 우변의 각 항은 각각 1차 시스템의 간섭 채널, 다른 2차 시스템 j 의 간섭 채널, 그리고 부가 잡음의 공분산 행렬을 의미한다. 1차 시스템의 대역을 공유하는 2차 시스템은 모두 1차 시스템과 동일한 통신 방법을 사용하므로 매 프레임 마다 훈련 신호에 의해 간섭 잡음 공분산 행렬 \mathbf{W}_{S_k} 를 추정 가능하다. 2차 기지국 k 에서는 식(12)와 같이 간단한 백색화 정합 필터를 이용하여 간섭을 제거하므로 잡음 전력 이상의 간섭을 미치는 다른 2차 시스템의 수에 따라 간섭 제거 성능이 결정된다. 이때 간섭이 완전히 제거되는 조건은 다음과 같다.

$$\text{rank}(\mathbf{W}_{S_k} - \sigma^2 \mathbf{I}) \leq \min(M_{S_k}, N_{S_k}) - d_{S_k}. \quad (14)$$

여기서 d_{S_k} 는 2차 시스템이 송신하는 공간 스트림의 수이다. 따라서 식(9)와 (11), (14)를 모두 만족하는 경우, 1차 시스템과 2차 시스템이 모두 간섭이 없는 통신이 가능하다.

일반적으로 인지 라디오 시스템에서의 간섭 관리 기법은 2차 시스템이 1차 시스템이 미치는 간섭의 영향을 주로 고려한다. 이때 1차 시스템이 2차 시스템에 주는 간섭의 영향은 무시되거나 고려하지 않는다. 이 때문에 간섭 환경에 따라 1차 시스템의 간섭으로 인한 2차 시스템의 스펙트럼 효율이 저하되는 경우가 발생할 수 있다. 본 논문에서 제안한 기법은 1차 시스템이 2차 시스템이 미치는 간섭의 영향까지 고려함으로써 1차 시스템과 2차 시스템이 동일 주파수 대역 공유를 통해 주파수 이용효율 향상 효과를 얻는 동시에 지역별 스펙트럼 효율 향상 효과를 얻는다.

IV. 전산모의실험

본 절에서는 통해 제안된 간섭 관리 기법의 채널 용량 성능을 비교 및 검증하기 위해 전산 모의실험을 수행하였다. 전산모의실험을 위해 1차 시스템과 2차 시스템은 모두 두 개의 송신 안테나와 두 개의 수신 안테나를 갖는다고 가정한다. 또한 TDD 시스템을 가정하였으며 훈련신호를 통해 채널 행렬을 정확하게 추정한다고 가정한다. 실험의 단순화를 위해 2차 사용자가 1차 기지국에 랜덤 액세스 후 1차 시스템의 상향링크 통신에 동기화하기까지 소요되는 시간 지연

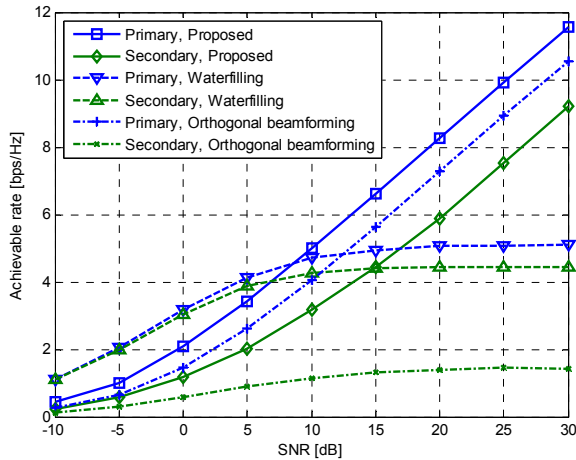


그림 2. 2차 시스템이 하나일 때 채널 용량 성능 비교.
Fig. 2. Capacity performance with one secondary System.

은 무시한다. 무선 채널은 각각 독립적인 레일리 페이딩 (Rayleigh fading) 채널을 가정하며 한 프레임 동안 채널 값이 변화하지 않는 블록 페이딩을 가정한다. 2차 사용자와 1차 기지국 간의 경로 손실은 $\alpha_{PS_s} = 1$ 로 가정하며 1차 사용자와 2차 기지국 간의 경로 손실은 $\alpha_{S_sP} = 0.7$ 로 가정한다. 그리고 그림 1과 같이 2차 시스템의 지리적 분포를 고려하여 2차 시스템 간의 간섭은 영향을 미치지 않는다고 가정한다 ($\alpha_{S_sS_s} = 0$).

그림 2는 하나의 2차 시스템이 1차 시스템의 주파수를 공유할 때의 채널 용량을 보인다. 성능 비교를 위해 간섭을 고려하지 않고 자신의 행렬만을 이용하는 전력 할당 기법^[9]과 직교 빔포밍^[8]의 채널 용량과 성능을 비교하였다. 이때 직교 빔포밍은 송수신기가 모두 다중 안테나를 가지는 경우 적용이 불가능하나 본 절에서는 성능 비교를 위해 직교 빔포밍 기법에 한정하여 2×1 MIMO 시스템을 가정하며 1차 시스템에서는 MRT (Maximum ratio transmission)을 적용하고 2차 시스템에 직교 빔포밍을 적용한다. 제안된 간섭 관리 기법은 1차 시스템과 2차 시스템이 각각 $d_p = d_s = 1$ 의 공간 스트림을 전송하고 Water-filling의 경우 1차 시스템과 2차 시스템이 모두 $d_p = d_s = 2$ 개의 공간 스트림을 전송한다. 그림 2에서 보이는 바와 같이 제안된 기법과 직교 빔포밍 기법에서 1차 시스템은 2차 시스템에 의한 간섭의 영향을 받지 않고 SNR 증가에 따라 채널 용량 성능이 선형적으로 증가한다. 반면 간섭을 고려하지 않는 전력 할당 기법은 2차 시스템의 간섭으로 인해 채널 용량이 특정 값에서 수렴

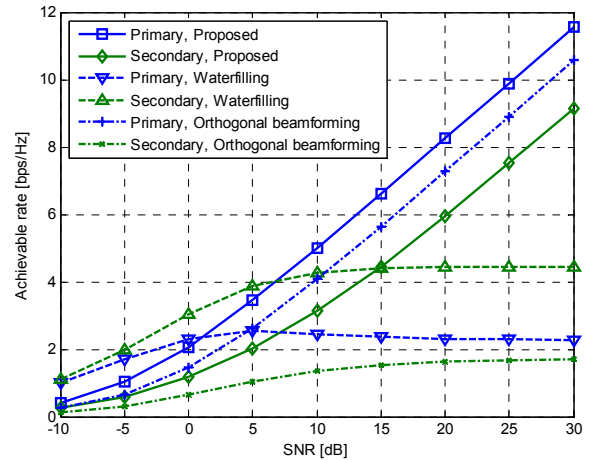


그림 3. 2차 시스템이 두 개일 때 채널 용량 성능 비교.
Fig. 3. Capacity performance with two secondary systems.

한다. 다만 낮은 SNR 영역에서는 가장 높은 채널 용량을 갖지만 이는 간섭 보다는 가우시안 부가 잡음이 성능을 결정하는 데 보다 더 지배적인 요소로 작용하기 때문이다. 2차 시스템의 채널 용량 측면에서 보았을 때 전력 할당 기법과 직교 빔포밍 기법은 모두 1차 시스템으로부터의 간섭으로 인해 성능이 제한된다. 반면 제안된 기법은 백색화 정합 필터를 통해 1차 시스템의 간섭을 모두 제거하기 때문에 1차 시스템으로부터의 간섭의 영향을 받지 않는다. 2차 시스템의 프리코딩 행렬이 단순히 간섭을 제어하는 목적이기 때문에 1차 시스템에 비해 상대적으로 배열 이득 또는 다이버시티 이득을 얻기 힘들다. 지역적인 스펙트럼 효율 측면에서 기존의 방법에 비해 효율적이다.

그림 3은 두 개의 2차 시스템이 1차 시스템의 주파수를 공유할 때의 채널 용량을 보인다. 실험의 가정 $\alpha_{S_sS_s} = 0$ 에 의해 2차 시스템의 성능은 그림 2와 동일하다. 이때 전력 할당 기법은 간섭의 양이 더욱 증가함에 따라 채널 용량이 더욱 낮은 값으로 제한된다. 반면 제안된 방법은 2차 시스템의 수가 증가하더라도 1차 시스템은 간섭의 영향을 받지 않기 때문에 주파수 공유 측면에서 훨씬 효율적이다. 직교 빔포밍 기법은 1차 시스템에 간섭을 미치지 않으나 2차 시스템이 1차 시스템으로부터 받는 간섭을 제어할 수 없기 때문에 2차 시스템의 주파수 공유 효과는 매우 미비하다. 따라서 제안된 방법은 1차 시스템에 미치는 간섭의 영향을 최소화하는 동시에 2차 시스템도 그에 준하는 효과를 얻으므로 기존의 기법들에 비해 지역 당 주파수 효율 측면에서 우수함을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 인지 라디오 시스템에서 효율적인 간섭 관리를 위한 프로토콜과 프리코딩 및 간섭 제거 기법을 제안하였다. 제안된 기법에서 2차 사용자는 상향링크 통신을 시작하기 전, 동일한 주파수 대역을 사용중인 1차 기지국으로 랜덤 액세스한다. 1차 기지국은 2차 시스템의 존재를 인지한다. 2차 사용자는 1차 시스템의 하향링크 시 간섭 채널 정보 및 송·수신 필드 정보를 수신하고 이를 이용하여 프리코딩 행렬을 계산한다. 이때 2차 시스템의 간섭은 모두 1차 시스템의 사용하지 않는 부채널로 전송되므로 1차 시스템은 추가적인 연산 없이 자동적으로 간섭을 제거한다. 2차 기지국은 백색화 정합 필터를 사용하여 1차 시스템으로부터의 간섭을 제거함으로써 스펙트럼 효율을 더욱 향상시킨다. 전산 모의실험을 통해 제안된 간섭 관리 기법은 1차 시스템에 간섭을 미치지 않는 동시에 2차 시스템의 성능이 기존 방법에 비해 향상됨을 확인하였다. 또한 2차 시스템의 수가 증가하더라도 1차 시스템은 전혀 영향을 받지 않음을 확인하였다.

References

[1] FCC, *Spectrum policy task force report*, ET Docket No. 02-155, Nov. 2002.

[2] FCC, *Notice of Rule Making and Order*, ET Docket No. 03-322, Dec. 2003.

[3] J. Mitola, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in *Proc. IEEE Workshop Mobile Multimedia Commun. (MoMuC '99)*, pp. 3-10, San Diego, U.S.A., Nov. 1999.

[4] IEEE, "IEEE P802.11afTM/D1.02 Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 3: TV White Spaces Operation U.S.," June 2011.

[5] IEEE, "IEEE Std 802.22TM-2011 IEEE Standard for Information Technology -

Telecommunications and information exchange between systems Wireless Regional Area Networks (WRAN) - Specific requirements - Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands," July 2011.

[6] V. R. Cadambe and S. A. Jafar "Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3424-3441, Aug. 2008.

[7] 3GPP, *Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects*, TR 36.819 ver. 11.1.0, Dec. 2011.

[8] Y. Kwon, H. Kim, J. Yoo, and J. Chung, "Orthogonal beamforming methodology in cognitive radio networks," in *Proc. 3rd Int. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks Commun. (CrownCom 2009)*, pp. 1-5, Singapore, May 2008.

[9] E. Teletar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Trans. Telecommun.*, vol. 10, no. 6, pp. 585-595, Dec. 1999.

서 종 필 (Jongpil Seo)



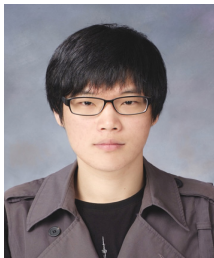
2009년 2월 인하대학교 전자공학과
 2011년 2월 인하대학교 전자공학과 석사
 2011년 3월~현재 인하대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> OFDM, MIMO, Cognitive radio, LTE-Advanced

양 참 솔 (Chamsol Yang)



2012년 2월 인하대학교 전자
공학과 졸업
2012년 3월~현재 인하대학교
전자공학과 석사과정
<관심분야> OFDM시스템,
MIMO, Cognitive radio

박 건 우 (Gunwoo Park)



2012년 2월 인하대학교 전자
공학과 졸업
2012년 3월~현재 인하대학교
전자공학과 석사과정
<관심분야> 수중 음향 통신,
IMT-Advanced, cooperative
MIMO

정 재 학 (Jaehak Chung)



1988년 2월 연세대학교 전자공
학과
1990년 2월 연세대학교 전자공
학과 석사
2000년 University of Texas at
Austin 전기전산 학과 박사
2000년~2001년 post doctoral
fellow, University of Texas at Austin
2001년~2005년 수석연구원, 삼성종합기술원
2005년~현재 인하대학교 부교수
<관심분야> Cognitive radio, 차세대 무선 이동 통
신, MIMO-OFDM, UWB, Cross layer설계