

무선랜 환경에서 간섭정렬 기술의 성능 평가

윤 석 현*, 신 원 용°

Performance Evaluation of Interference Alignment Technique in Wireless LAN Environment

Seokhyun Yoon*, Won-Yong Shin°

요 약

본 논문에서는 802.11ac 규격 기반의 WiFi 서비스에서 간섭정렬 알고리즘의 적용에 따른 성능 향상을 평가하기 위해 스케줄러를 연동한 물리계층 시뮬레이터를 구성하고 이를 이용하여 수행한 모의실험 결과를 제시한다. 특히, 완전한 채널정보를 가정하고 [13]에서 제안된 SLNR(Signal-to-Leakage-interference-and-Noise Ratio) 기반의 간섭정렬 기술과 다중사용자 빔형성을 사용한 시간공유 기술을 비교하였고, 결과적으로, 비례공평 스케줄러 하에서 간섭정렬 기술이 시간 공유 기술 대비 70%~100% 정도의 수율 이득이 있음을 확인하였다.

Key Words : Interference Alignment, WLAN, MIMO, Proportional fair scheduling

ABSTRACT

In this paper, we consider the performance improvement that can be obtained with interference alignment (IA) technique applied to 802.11ac based multi-BSS WiFi service. To this end, we developed a system simulator consisting of a link-level PHY simulator, based on 802.11ac specification, and multi-BSS proportional-fair scheduler. Specifically, assuming perfect channel side information and synchronization of signals from multiple APs, we used a SLNR based interference alignment algorithm proposed in [13] and compared its performance with that of multiuser beamforming based time-sharing system. The performance was evaluated in terms of average throughput per BSS and 5% worst user throughput. The results show that 70 to 100% throughput gain can be obtained in this ideal scenario.

I. 서 론

최근의 4세대 통신은 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 시스템이 물리계층 대표 기술로 사용되고 있다. OFDM 기반의 통신에서는 여러 명의 사용자가 대역폭을 분할하여 사용함으로써 이전 통신 기술에 비해 무선 자원 효율을 증대시켰다. 하지만 현재 4세대 통신 기술은 사용자 노드 수가 기하급수적으로 늘어남으로서 발생하는 간섭 현상에 유연하

게 대처하지 못하고 있으며 이에 따라 용량적 한계를 갖고 있다. 따라서 차세대 통신 시스템에서는 다양한 간섭 환경을 고려한 효율적인 스케줄링 및 간섭 관리를 통해 무선 전송 효율을 극대화시킬 수 있어야 한다. 특히 IEEE 802.11ac 시스템과 같은 multi-BSS 환경에서는, 간섭양이 시스템 전체 용량에 절대적인 영향을 끼치므로 스케줄링 및 간섭 완화를 위한 빔형성, 그리고 송신 전력 제어 등을 적절히 수행해주어야 하는데 이러한 문제의 해결을 위해 [1,2]에서는 실제 셀

* 본 연구는 한국연구재단 기본연구지원사업 기본연구과제 (NRF-2012R1A1A2038807)의 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : Dankook University, School of Electronics and Electrical Eng. syoon@dku.edu, 정회원

° Corresponding Author : Dankook University, Department of Mobile Communications System, wyshin@dankook.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2016-10-284, Received October 1, 2016; Revised November 24, 2016; Accepted November 25, 2016

물라 통신에서 발생하는 간섭 상황을 단순화한 다중 사용자 간섭 채널이 모형화 되었고, 이러한 모형 하에서 간섭 문제를 근본적으로 해결하기 위해 “간섭정렬” 기술이 소개되었다.

국내에서도 이와 관련한 많은 연구가 진행되었는데 논문 [1-2]에서 가정하는 다중사용자 간섭 채널 하에서 최적의 멀티플렉싱 이득을 얻는데 있어서의 효율적인 빔형성 기법 연구^[3], 편광 안테나를 사용함으로써 가정하는 가시선 (line-of-sight) 채널에서의 간섭정렬 방식 구현^[4], 다중안테나 사용 시 반복적으로 송/수신단 빔 형성기를 업데이트하는 간섭정렬 기법 개발^[5]과 같은 연구가 수행되었으며 [6-7]에서는 하나의 셀 안에 다수의 사용자가 존재하는 셀룰라 네트워크에서 효율적인 간섭정렬 방법을 제안하였다. 또한, 다양한 무선 네트워크 환경에서 간섭정렬 기반 간섭 관리 기술도 연구되었는데, 대표적으로 다중안테나 시스템^[2,8], X 네트워크^[9], 셀룰라 네트워크^[6,7,10,11]을 포함한다.

이러한 연구 및 기술 동향을 감안하여 본 논문에서는 다중사용자, 다중안테나를 지원하는 802.11ac 규격을 기반으로 [12,13]에서 제안된 간섭정렬 기술을 통한 수율 이득의 성능 평가를 수행하며 특히, 멀티 BSS 환경과 802.11ac 채널모형을 가정하고 물리계층 시뮬레이터를 확장, 간단한 IA 스케줄링을 시뮬레이션에 적용하여 시간 공유 방식대비 어느 정도의 수율 성능 향상이 얻어지는지 확인하는 것을 목표로 한다.

II. 시스템 구성 및 간섭정렬 알고리즘의 적용

본 장에서는 IA 알고리즘의 적용에 따른 성능 향상을 평가하기 위한 시스템 구성과 간섭정렬 알고리즘에 대해 설명한다. 본 논문에서 특히 802.11ac 기반 WiFi 시스템에 간섭정렬을 적용하며 동일한 주파수를 사용하는 인접한 K개의 BSS(Basic Service Set) 간의 간섭을 간섭 정렬 알고리즘을 통해 완화하여 전체 BSS의 수율을 최대화하는 것을 목표로 하되 공평성을 고려하여 전체 수율과 5% 하위 수율을 동시에 평가한다.

이러한 성능 평가를 위해 본 연구에서 구축한 시뮬레이터는 802.11ac 기반의 물리계층 시뮬레이터와 간섭정렬 알고리즘을 포함하는 스케줄러로 구성된다. 일반적으로 물리계층 시뮬레이터는 링크레벨에서의 오류율 성능을 평가하나 다수의 BBS와 다수의 사용자가 참여하는 간섭정렬 알고리즘의 성능 평가를 위해서는 자원할당 스케줄링이 적용되어야 한다. 한편, 자원할당 스케줄러는 간섭정렬에 참여할 사용자의 선택,

각 사용자가 사용할 프리코더 및 MCS 레벨의 결정을 수행하는데 공간 다중화가 적용될 경우 MCS 레벨의 결정을 위한 처리과정이 정의되지 않아 본 논문에서는 스케줄러에서 간섭정렬에 참여할 사용자 집합과 프리코더 만을 선택하고 물리계층 시뮬레이터에서 모든 MCS 레벨에 대한 오류 성능을 평가한 후 이로부터 최대 수율을 얻는 방식으로 간섭정렬의 사용에 따른 수율 성능 평가를 수행한다.

2.1 802.11ac 물리계층의 구성 및 동작

본 논문에서는 IEEE 802.11ac의 물리계층 전송 규격을 기반으로 물리계층 시뮬레이터를 구축하였는데 802.11ac VHT(Very High Through-put) PPDU의 Data 필드의 경우 단일 사용자(SU) 모드와 다중사용자(MU) 모드가 다르게 구성되며 다중사용자 모드를 지원하는 전체적인 송신단 구성은 그림 1과 같다. 한편 수신부는 각 사용자별로 따로 구현되며 사용자별 수신기의 전체 구성도는 그림 2와 같다. 여기서, 등화기는 MMSE(minimum mean square error) 등화기를 고려하며 이는 각 부반송파에 대한 채널이 다르므로 부반송파 단위로 적용되는데 시공간부호가 사용될 경우와 사용되지 않을 경우에 대해 달리 적용된다. 그러나 본 논문에서는 시공간부호를 사용하지 않는 경우만 고려하였으며 이 경우 등화기의 동작은 다음과 같다. 우선, r_t 를 t 번째 OFDM 심볼의 특정 부반송파에 대한 수신신호 벡터라 하고 H_e 를 프리코더를 포함하는 실효 채널행렬로 정의하자. 표현의 간결성을 위해 부반송파 인덱스는 사용하지 않으며 모든 부반송파에 대한 MMSE 등화는 아래에 기술되는 방법이 동일하게 적용된다. 또한, 한 프레임 구간 내에서 채널은 변하지 않는다고 가정한다. 이러한 정의와 가정으로부터 MMSE 등화기의 출력 x_t 와 이의 SINR π_t 는 각각 다음과 같다.

$$x_t = H_e^H K^{-1} r_t \tag{1}$$

$$\pi_t = \text{diag}(H_e^H K^{-1} H_e) \tag{2}$$

여기서, $K = (\sigma^2 I + H_e H_e^H)$ 이며 σ^2 는 배경 잡음전력이다. x_t 는 심볼 디맵퍼로 입력되어 각 심볼에 포함된 부호비트에 대한 LLR의 연산에 적용되며 π_t 는 SINR 벡터로 이의 각 요소는 각 스트림의 실효 SINR을 의미하며 부호비트에 대한 LLR의 가중치로 적용되어 이 가중치가 적용된 LLR이 사용자 처리 블

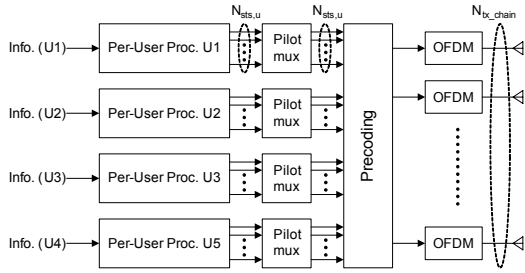


그림 1. 802.11ac 송신기 블록도
Fig. 1. 802.11ac transmitter structure

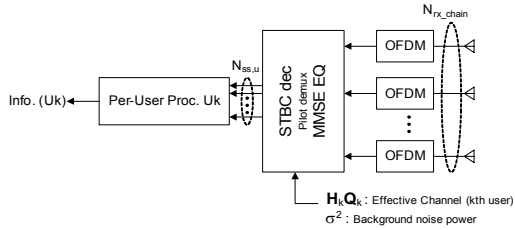


그림 2. 802.11ac 수신기 블록도
Fig. 2. 802.11ac receiver structure

록으로 전달된다.

2.2 간섭정렬 알고리즘

본 논문에서는 상대적으로 높은 네트워크 수용을 얻을 수 있는 빔형성 기반 간섭정렬 기술[12,13]을 적용한다. 각 AP는 자신이 직접 간섭에 영향을 줄 수 있는 사용자들에 대한 채널을 측정 한 후 각 사용자에게 줄 수 있는 간섭 영향을 고려하여 자신의 전송 빔형성 행렬을 계산한다. 본 논문에서는 각 사용자를 위한 빔이 동일 BSS내의 타 사용자 뿐 아니라 타 BSS의 사용자에게 얼마나 많은 영향을 주는지 동시에 고려하기 위해 각 간섭 채널에 대한 공분산 행렬을 먼저 계산하는데 이를 통해 각 사용자를 위한 빔이 타 사용자에게 미치는 영향을 빔형성 행렬의 2차 형식으로 계산할 수 있다. 우선, g 번째 BSS의 AP와 k 번째 BSS 내의 l 번째 STA와의 채널 행렬을 $H_g^{k,l}$ 이라 하자. 여기서 $l \in \Phi_k$ 이며 $g, k \in \{1, 2, \dots, K\}$, Φ_k 는 k 번째 BSS 내의 활성 사용자 집합, K 는 간섭정렬에 참여하는 인접 BSS의 개수이다. 그러면, g 번째 BSS의 AP가 g 번째 BSS의 s 번째 STA에 대해 데이터 전송을 위해 사용해야 하는 프리코더 $W_{g,s}$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$W_{g,s} = [e_1(T_{g,s}), e_2(T_{g,s}), \dots, e_S(T_{g,s})] \quad (3)$$

여기서, S 는 사용자당 스트림 수, $e_l(T)$ 는 행렬 T 의 l 번째로 큰 고유벡터이며 $T_{g,s}$ 는 다음과 같다.

$$T_{g,s} = (C_g^{g,s})^{-1} (H_g^{k,s})^H H_g^{g,s} \quad (4)$$

$$C_g^{g,s} = \sigma_n^2 I + \sum_{\substack{l \in \Phi_k \\ l \neq s}} (H_g^{g,l})^H H_g^{g,l} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq g}}^K \sum_{l \in \Phi_k} (H_g^{k,l})^H H_g^{k,l} \quad (5)$$

각 AP가 다중의 사용자를 위해 동시에 신호를 전송할 때 각 사용자는 MMSE 복호기를 사용하여 자신의 신호를 복호 할 수 있다. 즉, 각 사용자는 자신의 목표 신호 이득 및 간섭과 잡음을 고려하여 SINR을 최대화하는 방향으로 신호를 복호 할 수 있다. 이를 위해 우선 각 사용자는 간섭 및 잡음에 대한 공분산 행렬을 계산하여 간섭 및 잡음의 증폭을 최대한 억제하면서도 자신의 채널 이득을 최대화할 수 있는 수신 신호 부공간 $G_{g,s}$ 를 목표 채널 및 간섭 채널에 대한 공분산 행렬 $U_g^{g,s}$ 를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$G_{g,s} = [e_1(U_{g,s}), e_2(U_{g,s}), \dots, e_S(U_{g,s})] \quad (6)$$

여기서,

$$U_g^{g,s} = (D_g^{g,s})^{-1} (H_g^{g,s})^H W_{g,s} (W_{g,s})^H H_g^{g,s} \quad (7)$$

$$D_g^{g,s} = \sigma_n^2 I + \sum_{\substack{l \in \Phi_k \\ l \neq s}} p_{g,l} (H_g^{g,l})^H W_{g,l} (W_{g,l})^H H_g^{g,l} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq g}}^K \sum_{l \in \Phi_k} p_{k,l} (H_k^{g,l})^H W_{k,l} (W_{k,l})^H H_k^{g,l} \quad (8)$$

이며 $p_{g,s}$ 는 g 번째 BSS의 AP가 g 번째 BSS의 s 번째 STA에 할당된 전력이다. 각 사용자는 자신을 위한 신호 및 간섭 신호를 받은 이후 부공간 행렬 $G_{g,s}$ 을 활용하여 여파할 수 있으며 최종적으로는 $G_{g,s}$ 에 의해 변형된 신호를 복구하는 영-강제 행렬 $R_{g,s}$ 를 이용하여 자신이 원하는 신호를 복호 할 수 있다. $R_{g,s}$ 는 다음과 같다.

$$R_{g,s} = (p_{g,s} G_{g,s}^H H_{g,s}^{g,s} W_{g,s})^{-1} G_{g,s} \quad (9)$$

한편, 간섭정렬 알고리즘의 효과적인 적용을 위해서는 각 STA에 도착한 각 AP로부터의 신호는 CP길이 이내에서 동기가 맞아야 하며 전송된 신호의 프레임 길이도 동일하다는 조건을 요구한다. 물론, 이러한 조건을 현실적으로 만족시키는 것이 쉽지는 않으나 본 논문에서는 이러한 부정합이 존재하지 않는 이상적인 상황을 전제로 시뮬레이터를 구성하였다.

III. 모의 실험을 통한 성능 평가

그림 3은 본 논문에서 가정하는 3개의 BSS로 구성된 무작위 배치 시나리오를 나타내는데 3개의 AP가 원상에 120°도 간격으로 배치되어 있고 모든 STA들(큰 원내의 작은 동그라미들)은 원안의 영역에 존재한다고 가정한다. 몇 가지 핵심적인 시뮬레이션 및 배치 시나리오의 파라미터는 다음의 표 1과 같다.

그림 3에서 각 STA에 대해 표기된 세 개의 값은 각각 AP1, AP2, AP3로부터 전송된 신호의 평균 수신 전력을 dBm으로 나타낸 값으로 평균 수신신호 전력은 모든 주파수(모든 경로) 및 모든 수신 안테나에서의 신호 전력을 평균 낸 값이다.

그림 3의 배치 시나리오에서 각 AP와 각 STA간의

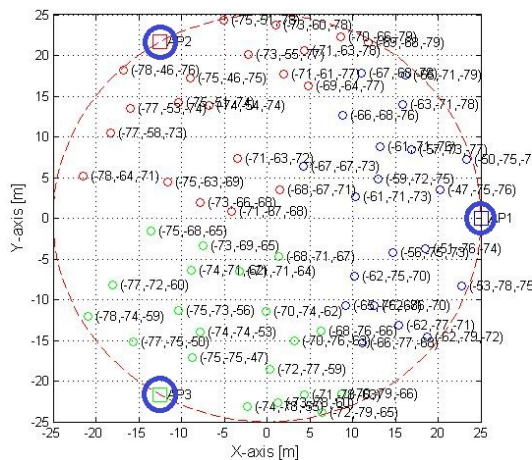


그림 3. 시나리오에 따라 생성된 AP 및 STA의 배치 및 평균 수신신호 전력; 원 상의 3개 사각형은 AP의 위치를 나타내며 작은 동그라미는 STA의 위치를 괄호내의 세 값은 각 AP로부터 수신된 신호의 평균 전력을 나타냄.

Fig. 3. AP and STA deployment scenario. 3 small squares along the large circle indicate 3 APs and small circles within the large circle indicates STAs. The 3 values in parenthesis are average received signal powers from 3 APs at the STA position.

표. 1 모의 실험에 사용된 기본 파라미터
Table. 1 Some of the key simulation parameters.

파라미터	값
Number of BSSs	3
Number of STA per BSS	20
Number of Active STA per BSS	2
Number of Tx(AP) Antenna	6
Number of Rx(STA) Antenna	4
Inter-AP distance	43.3 m
AP Tx power	17 dBm
AP (Tx) Antenna gain	4 dBi
STA (Rx) Antenna gain	-2 dBi
Noise Figure	7 dB
Noise PSD	-175 dBm/Hz

채널은 802.11ac Working Group에서 제안한 채널 모형을 적용하였는데 실제의 채널 모형은 주변 사물의 이동을 고려한 느리게 변하는 시변 채널이나 시뮬레이션 시간의 단축과 현실적인 제약 등을 고려하여 생성된 채널의 특정 시간에서의 표본만을 취해 사용함으로써 채널에 시간적으로 변화가 없다는 가정 하에 시뮬레이터를 구성하였다. IA를 지원하는 확장된 물리계층 시뮬레이터를 통한 시뮬레이션의 수행 과정은 다음과 같다.

=====

□ 초기화: 파라미터 초기화 및 채널생성

□ Loop

1. 배치 시나리오에 따라 생성된 채널에 대한 정보 및 각 사용자 별 서비스 데이터 율을 입력으로 받아 사용자간 비례 공평성을 고려하여 활성 STA 집합 및 각 STA를 위해 사용될 프리코더를 선택함.
2. 스케줄링의 출력에 해당하는 활성 STA 집합과 각 활성 STA에 대한 프리코더 행렬을 이용하여 물리계층 시뮬레이터의 전송 파라미터 설정한 후 물리 계층 시뮬레이션 수행
3. 모든 MCS 레벨에 대해 설정된 율수만큼의 프레임에 대해 PER을 평가하고 이를 이용하여 사용자당 수율을 평가
4. 물리계층 시뮬레이션 결과로부터 달성 가능한 최대 수율 및 각 사용자 별 서비스 데이터 율을 획득하고 다음번 스케줄링에서 사용함.

=====

물리계층 시뮬레이션 결과는 모든 MCS 레벨에 대한 프레임 오류율로 제공되는데 이들로부터 사용자 수율 S는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \max_{m \in \text{MCS set}} PER_m \cdot R(m, N_{ss}) \quad (10)$$

여기서 $R(m, N_{ss})$ 는 MCS 레벨 m , 공간 스트림 수 N_{ss} 인 경우의 실효 전송율로 802.11ac 규격서에 정의되어 있다. 다음의 그림 4는 모든 MCS 수준에 대한 링크레벨 시뮬레이션 결과로부터 평균 수율을 획득하는 과정을 보여 주는데 802.11ac에서는 총 9가지의 MCS 레벨을 사용하므로 이들 MCS에 대한 PER 곡선을 모두 얻고 이로부터 최대 평균 수율을 획득하였다.

본 논문에서는 이러한 배치 시나리오와 시뮬레이션 방법에 따라 다음의 2가지 경우에 대한 성능을 평가하였다.

1. 완전한 채널 정보를 이용한 시간 공유 스케줄링 적용 시스템 (TS - Perfect CSI)
2. 완전한 채널 정보를 이용한 간섭 정렬 스케줄링 적용 시스템 (IA - Perfect CSI)

시뮬레이션 결과로부터 BSS 당 평균 수율과 BSS 당 하위 5% STA들의 평균 수율은 표 2와 같다. 표 2를 보면 완전한 채널 정보를 이용한 경우 시간 공유 방식과 간섭정렬 적용시스템은 각각 257Mbps와 528Mbps를 보여 간섭 정렬을 사용한 경우 100% 이상의 이득을 얻을 수 있음을 보여주며 이러한 패턴은 하위 5% 사용자에 대한 결과에서도 비슷하게 얻어졌다. 아래의 그림 5는 모의 실험을 통해 얻은 사용자당

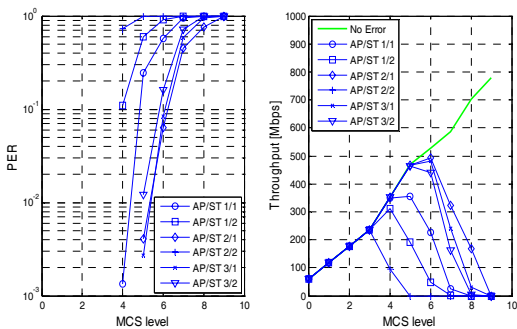


그림 4. 모든 MCS 수준에 대한 링크레벨 시뮬레이션 결과로부터 평균 수율의 획득.
Fig. 4. Estimating average throughput from link level simulation results for all MCS levels

수율의 누적분포 함수를 보여준다.

표 2 BSS 당 평균 수율 및 BSS 당 하위 5% 사용자 평균 수율
Table.2 Average throughput and 5% worst user throughput per BSS

Scenario	Average throughput per BSS	5% worst user throughput
TS Perfect CSI	257 Mbps	7.6 Mbps
IA Perfect CSI	528 Mbps	12.8 Mbps

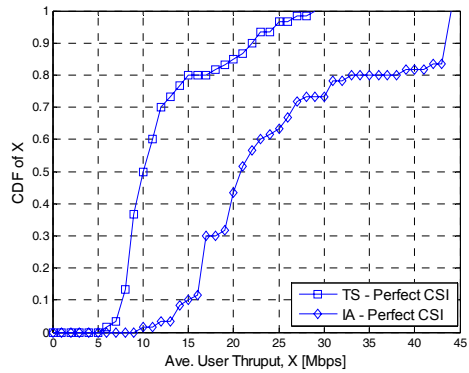


그림 5. 사용자당 수율의 누적분포 함수
Fig. 5. Cumulative distribution function(CDF) of per-user throughput

IV. 결론

본 논문에서는 간섭정렬 알고리즘의 적용에 따른 성능 향상을 평가하기 위해 스케줄러를 연동한 물리계층 시뮬레이터를 구성하고 이를 이용한 다양한 환경에서의 모의실험 결과를 제시하였다. 모의실험에서는 Perfect CSIT을 가정하고 SLNR 기반으로 설계된 간섭정렬 기술과 시간 공유 기법을 비교하였고, 비례공평 스케줄러 하에서 간섭정렬 기법이 시간 공유 기술 대비 70%~100% 정도의 수율 이득이 있음을 확인하였다. 한편, 본 논문에서는 각 AP로부터의 신호가 CP길이 이내에서 동기가 맞는다고 가정하였으며 완벽한 채널 정보를 가정하였는데 이러한 가정은 현실적인 시스템에서 구현하기는 매우 어려우며, 따라서 이러한 동기의 부정합과 부분적 채널 정보만을 활용한 경우에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

References

[1] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and degrees of freedom of the K -user interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.

[2] K. Gomadam, V. R. Cadambe, and S. A. Jafar, "A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 6, pp. 3309-3322, Jun. 2011.

[3] S. W. Choi, S. A. Jafar, and S.-Y. Chung, "On the beamforming design for efficient interference alignment," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 11, pp. 847-849, Nov. 2009.

[4] S. H. Chae, S. W. Choi, and S.-Y. Chung, "On the multiplexing gain of K -user line-of-sight interference channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 10, pp. 2905-2915, Oct. 2011.

[5] H. Yu, Y. Sung, H. Kim, and Y. H. Lee, "Beam tracking for interference alignment in slowly-fading MIMO interference channels: A perturbations approach under a linear framework," *IEEE Trans. Sig. Process.*, vol. 60, no. 4, pp. 1910-1926, Apr. 2012.

[6] B. C. Jung and W.-Y. Shin, "Opportunistic interference alignment for interference-limited cellular TDD uplink," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 148-150, Feb. 2011.

[7] B. C. Jung, D. Park, and W.-Y. Shin, "Opportunistic interference mitigation achieves optimal degrees-of-freedom in wireless multi-cell uplink networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 7, pp. 1935-1944, Jul. 2012.

[8] T. Gou and S. A. Jafar, "Degrees of freedom of the K -user $M \times N$ MIMO interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 12, pp. 6040-6057, Dec. 2010.

[9] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and the degrees of freedom of wireless X networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 9, pp. 3893-3908, Sept. 2009.

[10] C. Suh and D. Tse, "Interference alignment for cellular networks," in *Proc. 46th Annu. Allerton Conf. Commun., Control., Comput.*, pp. 1037-1044, Monticello, IL, Sept. 2008.

[11] B. Nourani, S. Matahari, and A. Khandani, "Relay-aided interference alignment for the quasi-static X channel," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, pp. 1764-1768, Seoul, Korea, Jun./Jul. 2009.

[12] W.-Y. Shin and B. C. Jung, "Network coordinated opportunistic beamforming in downlink cellular networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E95-B, pp. 1393-1396, Apr. 2012.

[13] H. J. Yang, W.-Y. Shin, B. C. Jung, and A. Paulraj, "Opportunistic interference alignment for MIMO interfering multiple-access channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2180-2192, May 2013.

윤 석 현 (Seokhyun Yoon)



1992년 : 성균관대학교 전자공학 학사
 1996년 : 성균관대학교 전자공학 석사
 2003년 : New Jersey Institute of Technology Electrical & Computer Eng. 박사

현재 : 단국대학교 전자전기공학부 부교수
 <관심분야> 무선통신, MIMO, OFDM

신 원 용 (Won-Yong Shin)



2002년 : 연세대학교 기계전자공학부 학사
 2004년 : KAIST 전자전산학과 석사
 2008년 : KAIST 전자전산학부 박사

2009년 5월~2011년 10월 : Harvard University Postdoctoral Fellow
 2011년 10월~2012년 2월 : Harvard University Research Associate
 2012년 3월~현재 : 단국대학교 컴퓨터학과 조교수
 <관심분야> 정보이론, 통신이론, 신호처리, 빅데이터 분석, 소셜네트워크 분석