

고밀집 환경에서 대용량 MIMO WLAN의 네트워크 용량 최대화를 위한 결합 공간 분할 및 재사용 기법

최 경 준*, 김 경 준*, 김 광 순^o

Joint Spatial Division and Reuse for Maximizing Network Throughput in Densely-Deployed Massive MIMO WLANs

Kyung Jun Choi*, Kyung Jun Kim*, Kwang Soon Kim^o

요 약

본 논문에서는 고밀집 환경에서 대용량 MIMO가 장착된 무선랜 시스템의 효율을 높이기 위한 방식으로 결합 공간 분할 및 재사용 기법을 제안한다. 제안한 기법은 다중 안테나로 생성할 수 있는 공간 자원을 간섭을 미리 억제하는데 사용하는 공간 자원과 캐리어 센싱 및 전송을 하는데 이용하는 공간 자원으로 분리한다. 분리된 공간 자원의 양에 따라 다른 캐리어 센싱 한계값을 할당하여, 해당 공간 자원으로의 전송 여부를 결정한다. 이 방식은 공간 분할 (spatial division) 최적화 문제와 공간 재사용 (spatial reuse) 최적화 문제를 동시에 고려해 네트워크의 전송 용량을 최대화한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 기법이 IEEE 802.11에서 정의된 캐리어 센싱 기법보다 네트워크의 용량을 133% 증가시키므로 차세대 무선랜 시스템에 적용하여 사용자에게 우수한 전송 품질을 제공해 줄 수 있음을 보인다.

Key Words : spatial division, spatial reuse, carrier sensing threshold, massive MIMO, WLAN

ABSTRACT

In this paper, joint spatial division and reuse (JSDR) scheme is proposed for maximizing network throughput in densely-deployed wireless local area networks equipped with massive antenna array. The proposed JSDR scheme divides the massive spatial space into two subspaces: one is for suppressing the interference from the neighboring access points and another is for sensing the carrier sensing and transmitting the information-bearing signals to intended stations. By using computer simulation, the proposed JSDR can provide 133% higher network throughput, compared to the carrier sensing technique defined in the IEEE 802.11 standard so that the proposed JSDR is suitable for the next generation WLAN systems.

* This work was supported by ICT R&D program of MSIP/IITP{2014-044-006-004, Next Generation WLAN System with High Efficient Performance}.

♦ First Author : School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, kjchoi@dcl.yonsei.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, ks.kim@yonsei.ac.kr, 중신회원

* School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, kimkj@dcl.yonsei.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2015-03-047, Received March 9, 2015; Revised March 25, 2015; Accepted March 25, 2015

I. 서 론

최근 스마트폰과 같은 모바일 기기의 급격한 증가로 인한 데이터 트래픽을 처리하기 위하여 차세대 무선 통신 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1] 스마트폰과 같은 사용자가 주로 사용하는 통신 시스템에는 각 통신사들이 제공하는 기지국 망을 이용하는 셀룰러 이동통신 시스템과 비면허 대역인 2.4GHz와 5GHz을 이용하여 근거리 통신 시스템을 제공하는 무선랜 시스템이 있다. 2013년 Mobidia의 자료에 따르면, 안드로이드 스마트폰에서 발생하는 데이터 트래픽은 2012년에 셀룰러 이동통신 시스템이 33% 무선랜 시스템이 67% 발생하였으나, 2013년에 셀룰러 이동통신 시스템이 27% 무선랜 시스템이 73% 발생하였을 정도로, 무선랜 시스템을 이용한 데이터 전송이 폭발적으로 증가하고 있다.^[2]

IEEE 802.11기반의 무선랜 시스템은 다중 사용자 간 무선채널의 분산 다중 접속을 위하여, 캐리어 센싱 다중 접속/충돌 회피 (CSMA/CA: carrier sensing multiple access/collision avoidance) 기반의 매체 접근 제어 (MAC: Medium access control)를 사용한다.^[3] 이러한 CSMA/CA기반의 MAC은 listen-before-talk 방식으로 데이터를 전송하기 이전에 무선 채널이 다른 인접 AP가 사용하는지 여부를 확인하고 비었다고 판단할 경우 다중 사용자간의 동시 전송으로 인한 충돌을 방지하기 위하여 일정 시간을 기다린 후 전송한다.^[3] 여기서 무선 채널이 비었는지 여부는 무선 채널의 수신 전력을 측정하여 그 전력과 정해진 캐리어 센싱 한계값 (carrier sensing threshold)을 비교하여 결정한다. 즉, 수신 전력이 캐리어 센싱 한계값보다 높으면 채널이 점유되었다고 판단하여 송신을 하지 않고, 수신 전력이 캐리어 센싱 한계값보다 낮으면 채널이 비어있다고 판단한다. IEEE 802.11기반의 무선랜 시스템에서는 이 캐리어 센싱 한계값으로 고정값인 -82dBm을 사용한다.^[3]

이전까지 무선랜 사용 환경과 달리 최근 무선랜이 주로 사용되고 있는 환경은 공항, 기차역, 백화점과 같은 실내 사용자 밀집 시설과 운동장, 변화가 등 실외 사용자 밀집 지역 등 다수의 사용자와 무선랜이 공존하는 고밀집 환경이다. 기존의 IEEE 802.11기반의 무선랜 시스템은 이러한 고밀집 환경을 고려하여 설계되지 않았으므로, 사용자에게 높은 전송 품질을 제공하기 어렵다. 특히, IEEE802.11기반 무선랜이 사용하는 캐리어 센싱 한계값 -82dBm은 사용자의 밀집 환경을 고려하지 않았으므로 사용자가 밀집된 환경에

서는 캐리어 센싱 부분에 따라 성능의 차이가 심하게 된다. 예를 들어, 캐리어 센싱이 민감할 경우 (낮은 캐리어 센싱 한계값을 가질 경우), 네트워크에서 채널 전송 권한을 획득하는 사용자의 수가 적어지는 반면, 전송 권한을 획득한 사용자가 받는 채널 품질은 우수하게 된다. 반대로 캐리어 센싱이 둔감할 경우 (높은 캐리어 센싱 한계값을 가질 경우), 네트워크에서 다수의 사용자들이 동시에 채널 전송 권한을 획득하지만, 서로 간의 간섭으로 인하여 채널 품질이 열악하게 된다. 따라서 밀집된 환경에서 IEEE 802.11기반 네트워크의 전송 속도를 최대화하기 위해서는 환경에 맞는 적절한 캐리어 센싱 한계값 설정이 필수적이다.

기존 논문에서는 다양한 방식의 캐리어 센싱 한계값을 정하는 방식이 제안되었다. 대표적으로, 간단한 시스템 모형을 이용하여 캐리어 센싱 한계값과 사용자의 전송율 (throughput) 간의 관계식을 유도하여 최적의 캐리어 센싱 한계값을 닫힌 형태 (closed-form)로 구하였고, 이를 네트워크의 환경에 따라 적응적으로 변화시키는 알고리즘을 제안하였다.^[4] 하지만, 이 방식은 페이딩과 다중 사용자의 간섭을 고려하지 않은 시스템 모형을 사용하였으므로, 실제 환경에서 사용하기 어렵다. 또한, 사용자의 밀집 환경에서 주변 밀도를 추정하여 캐리어 센싱 한계값을 설정하는 알고리즘을 제안하였다.^[5] 이 방식 역시 앞선 방식과 유사하게 간단한 시스템 모형을 가정하여 실제 환경에 사용하기 어렵다. 최근에 발표된 결과에서는 다중 사용자의 간섭을 실제와 유사하게 모형화한 시스템 모형을 통하여 최적의 캐리어 센싱 한계값을 구하였다.^[6] 하지만, 이 방식은 사용자의 배치가 육각형인 상황에서 worst-case 기준으로 구하였기 때문에, 무작위 배치된 상황에서 최적의 네트워크 전송 속도를 최대화할 수 없다.

최근에 표준화되어 상용화된 IEEE 802.11ac기반의 무선랜 시스템은 최대 8개의 공간 스트림을 다중 사용자에게 동시에 보내서 전송 용량을 증대하는 다중 사용자 다중 안테나 (MU-MIMO: multi-user multiple-input multiple-output)를 지원한다. 최근에, 이동통신 시스템인 LTE-A (long-term evolution advanced)가 64개 이상의 안테나를 사용하는 대용량 MIMO (Massive MIMO) 시스템을 연구 주제로 삼았고, IEEE 802.11 표준화 기구에서도 유사한 개념에 대한 기고가 발표되었다.^[7,8] 대용량 MIMO는 다수의 공간 자원을 이용하여 간단한 방식의 송수신 알고리즘으로 간섭을 억제할 수 있을 뿐만 아니라 빔형성을 통하여 수신 신호의 크기를 증가시킬 수 있다.^[9,10] 차

세대 무선랜 시스템은 대용량 MIMO를 채택하여 보다 많은 수의 안테나가 장착될 것으로 예상된다. 하지만 다수의 안테나를 가진 무선랜 시스템에서도 기존 CSMA/CA기반 MAC의 비효율적인 측면이 마찬가지로 발생한다. 또한, 앞서 언급한 기술들^[4-6]은 단일 안테나를 가정하였으므로, 다중 안테나 무선랜 시스템에 적합하지 않다.

본 논문에서는 고밀집 환경에서 다중 안테나를 사용하는 무선랜의 캐리어 센싱 한계값을 조절하여 네트워크의 전송 속도를 최대화 하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 공간 자원을 간섭을 미리 억제하는데 사용하는 공간 자원과 캐리어 센싱 및 전송을 하는데 이용하는 공간 자원으로 분리한다. 분리된 공간 자원의 양에 따라 다른 캐리어 센싱 한계값을 할당하여, 해당 공간 자원으로의 전송 여부를 결정한다. 이 방식을 다수의 안테나를 가진 AP에서 공간 분할 (spatial division)과 공간 재사용 (spatial reuse)를 동시에 고려하므로 결합 공간 분할 재사용 (JSDR: joint spatial division and reuse)이라 부른다.

이후 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템의 모형을 설명하고, III장에서는 기존의 캐리어 센싱 한계값 조절 방식에 대하여 알아보고, 다중 안테나를 사용하는 무선랜 시스템에서 문제점을 도출한다. IV장에서는 도출된 문제점을 해결하기 위하여 제안하는 JSDR 기법을 소개하고, V장에서는 모의실험을 통하여 성능을 검증하고, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모형

2.1 네트워크 및 채널 모형

2차원 네트워크 공간의 가운데에는 M 개의 안테나를 가진 다중 안테나 고효율 AP, X_0 가 있고, 단일 안테나를 가진 L 개의 AP들 $\{X_1, X_2, \dots, X_L\}$ 이 균일하게 분포한다. 또한, 단일 안테나를 가진 K 개의 STA들 $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_K\}$ 이 균일하게 분포한다. 여기서는 AP가 STA에게 전송하는 하향링크만을 고려한다. 각 AP들은 하나의 STA에게 전송할 데이터가 존재하고, AP X_i 이 전송할 STA를 $Y_{\pi(i)}$ 이라고 하자. 그리고 고효율 AP는 K' 개의 STA $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_{K'}\}$ 에게 전송할 데이터를 가지고 있다.

AP X_i 과 STA Y_k 사이의 스칼라 채널은 $g_{ik} = d_{ik}^{-\alpha/2} h_{ik}$ 이다. 여기서, d_{ik} 과 h_{ik} 는 각각 AP X_i 과 STA Y_k 사이의 거리와 페이딩을 나타내고, α 는

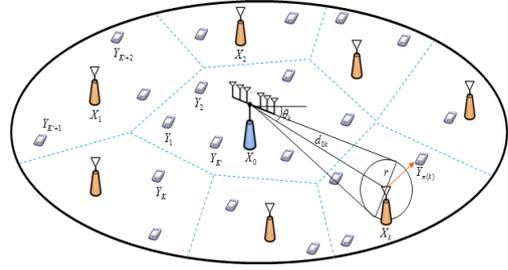


그림 1. 네트워크 모형
Fig. 1. Network model

경로 감쇄 지수이다. 또한, M 개의 안테나를 가진 고효율 AP X_0 와 STA Y_l 사이의 벡터 채널은 $g_{0l} = R_l^{1/2} h_{0l}$ 이다. 여기서, $R_l = E[g_{l0}g_{l0}^H]$ 은 채널 g_{0l} 의 상관 행렬이다. 논문^[11]과 유사하게, 그림 1과 같이 STA Y_k 가 방위각 (azimuth angle) θ_k 에 위치해 있고, 주변에 반지름 r 크기의 원모양의 산란체들이 있는 원형산란체 모형을 가정하자. 이때, 채널의 상관 행렬을 다음과 같다.

$$[R]_{m,p} = \frac{1}{2\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} e^{jk^T(t+\theta_k)(\mathbf{u}_m - \mathbf{u}_p)} dt \quad (1)$$

여기서, $\Delta \approx \arctan(r/d_{0k})$ 는 각퍼짐 (angular spread), $\mathbf{k}(t) = -2\pi/\lambda [\cos(t), \sin(t)]^T$, λ 는 반송파의 파장, \mathbf{u}_m 은 고효율 AP의 m 번째 안테나의 위치를 나타낸다. 유사하게 레가시 (legacy) AP X_n 과 레가시 AP X_m 사이의 스칼라 채널은 $z_{nm} = d_{nm}^{-\alpha/2} w_{nm}$ 이고, 고효율 AP X_0 와 레가시 AP X_n 사이의 벡터 채널은 $\mathbf{z}_{0n} = Q_{0n}^{1/2} \mathbf{w}_{0n}$ 이고, $Q_{0n} = E[\mathbf{z}_{0n}\mathbf{z}_{0n}^H]$ 이다.

2.2 IEEE 802.11 매체 접속 제어 방식

그림 2는 CSMA/CA기반의 IEEE 802.11에서는 매체 접속 제어 방식을 나타내며,^[12] 이 방식은 크게 두 가지 단계로 구성된다. 첫 번째 단계는 인접한 AP들이 무선 채널을 사용하고 있는지를 확인하는 캐리어 센싱 부분과 동시 전송으로 인한 충돌을 억제하기 위한 랜덤 백오프 부분이다.^[13,14] AP들이 채널을 사용하는지를 확인하기 위하여 에너지 검출 방식을 사용한다. AP X_i 에서 검출된 에너지를 $P_{CS}(X_i)$, 캐리어 센싱 한계값을 $\eta_{th}(X_i)$, 백오프 카운터를 $T(X_i)$ 이

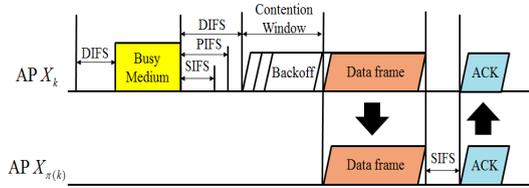


그림 2. IEEE 802.11 매체 접속 제어 방식
Fig. 2. IEEE 802.11 medium access control

라고 하자. 전송한 프레임에 가진 AP들은 채널의 에너지를 측정하여 $P_{CS}(X_i) > \eta_{th}(X_i)$ 이면 송신을 하지 않고 랜덤 백오프 카운터 $T(X_i)$ 를 정지시킨다. 반대로 $P_{CS}(X_i) \leq \eta_{th}(X_i)$ 이면 랜덤 백오프 카운터를 $T(X_i) - 1$ 로 줄인다. 만약, 랜덤 백오프 카운터가 0에 도착하면 송신한다. STA들은 신호를 수신하여 정상적으로 수신되었는지 확인하여 ACK 프레임을 AP로 전송한다. 이때, 각 STA는 미리 정해진 순서에 따라 ACK 프레임을 AP로 전송하는데 ACK 프레임 사이에는 SIFS (Short inter-frame space)를 쉰다.

IEEE 802.11 기반의 캐리어 센싱 방식은 환경에 관계없이 모든 AP들이 동일한 캐리어 센싱 한계값을 사용한다. 즉, X_1, \dots, X_L 에 대하여 $\eta_{th}(X_i) = \eta_{th}$ 이다. 또한, IEEE 802.11의 표준에서는 송신이 실패하면 랜덤 백오프 값을 $T'(X_i) = 2T(X_i) - 1$ 로 증가시키는 지수 랜덤 백오프를 사용한다. 본 논문에서는 랜덤 백오프로 인한 충돌은 무시하고 캐리어 센싱 부분으로 인한 공간 재사용에 집중한다. 참고로, 더 자세한 캐리어 센싱 방식과 IEEE 802.11기반의 표준은 참고문헌^[15-17]에 있다.

2.3 성능 지표

본 논문에서는 전송 권한을 가진 레가시 AP들이 전송하는 모든 용량과 고효율 AP의 합을 네트워크 성능 지표로 한다. 레가시 AP X_k 가 STA $Y_{\pi(k)}$ 에게 전송하는 신호의 SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio) γ_k^{legacy} 는 다음과 같다.

$$\gamma_k^{legacy} = \frac{P|g_{k,\pi(k)}|^2}{N_0 + P \sum_{j \in A} |g_{j,\pi(k)}|^2}. \quad (2)$$

여기서, $A = \{l | P_{CS}(X_l) \leq \eta_{th}\}$ 는 캐리어 센싱 부분에서 채널이 비어 있다고 판단하여 동시에 전송

하는 AP들의 집합이고, 검출된 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{CS}(X_l) = P \sum_{j \in A} |z_{jl}|^2 \quad (3)$$

고효율 AP의 SINR은 사용하는 프리코딩 알고리즘에 따라 달라진다. 여기서는 간단한 제로 포싱 (zero-forcing) 프리코딩 알고리즘을 사용한다. 또한, 송신단의 채널 정보는 완벽하다고 가정한다. 그리고 사용자에게 동일한 전력을 할당한다고 가정한다. X_0 가 STA들 $Y_1, \dots, Y_{K'}$ 에게 전송할 때, Y_k 가 수신하는 신호의 SINR γ_k^{HEW} 는 다음과 같다.

$$\gamma_k^{HEW} = \frac{\frac{P}{K'} |f_k^H g_{0,k}|^2}{N_0 + P \sum_{j \in A} |g_{j,k}|^2}. \quad (4)$$

그리고 이때의 네트워크 전송 용량은 다음과 같다.

$$R_{\Sigma} = \sum_{k \in A} \log_2(1 + \gamma_k^{legacy}) + \sum_{k=1}^{K'} \log_2(1 + \gamma_k^{HEW}). \quad (5)$$

본 논문의 목표는 네트워크 전송 용량 R_{Σ} 를 최대화하는 것이다.

III. 기존 방식의 문제점

기존 IEEE 802.11 방식의 캐리어 센싱은 대용량 MIMO와 같은 다수의 안테나 배열로 생성되는 공간 차원에 대한 고려 없이, 각 안테나에서 수신되는 전력을 기준으로 채널이 사용가능 여부를 결정한다. 그러나 대용량 MIMO의 공간 자원을 빔형성 (beamforming) 을 하여 STA들에게 전송하는데, 이 빔형성으로 다음과 같은 두 가지 요소를 캐리어 센싱에 고려하여야 한다:

- (1) 빔형성으로 목표 STA에게 전력 이득을 제공함에 따라 수신 전력이 달라지는 현상
 - (2) 빔형성으로 간섭을 제거하여 캐리어 센싱 범위의 다른 STA에서의 수신 전력이 달라지는 현상
- 먼저 (1)의 영향을 살펴보자. 그림 3의 (a)는 단일 안테나를 가진 레가시 AP의 예제이고, (b)는 다중 안

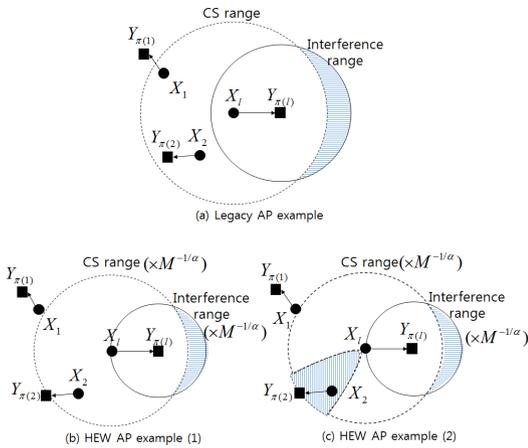


그림 3. 캐리어 센싱 범위와 간섭 범위 예제
Fig. 3. Carrier sensing range and interference range examples

테나를 가진 고효율 AP의 예제이다. 여기서 점선은 캐리어 센싱 범위를 나타내고, 가로로 빗금 친 영역은 간섭 범위를 나타낸다. 캐리어 센싱 범위는 캐리어 센싱 한계값으로 인하여 결정되어지고, 간섭 범위는 요구하는 SINR에 따라 결정된다. 레가시 AP가 제공하는 SINR을 γ^{legacy} , 고효율 AP가 제공하는 SINR을 γ^{HEW} 라고 하자. 고효율 AP가 M 차원 공간 자원을 이용하여 빔형성하여 사용자에게 전송할 경우, γ^{legacy} 과 γ^{HEW} 의 관계는 $\gamma^{HEW} = M\gamma^{legacy}$ 이다.^[18] 즉, 고효율 AP는 M 배 높은 SINR 신호 품질을 제공할 수 있으며, 동시에 간섭 범위가 $M^{-1/\alpha}$ 배 만큼 줄어들게 된다. 그에 따라 캐리어 센싱 범위도 $M^{-1/\alpha}$ 배 만큼 줄어들게 되고, 그에 따라 그림 3에서 레가시 AP 환경에서는 X_1 이 캐리어 센싱 범위에 속해 전송을 할 수 없지만, 고효율 AP 환경에서는 X_1 이 캐리어 센싱 범위에 속하지 않으므로 동시에 전송할 수 있다. 즉, 사용하는 공간 자원에 따라 달라지는 수신 신호의 품질을 고려하여 캐리어 센싱에 이용하여야 한다는 것을 알 수 있다.

이제 (2)의 영향을 살펴보자. 그림 3의 (c)는 고효율 AP가 X_2 와 STA $Y_{\pi(2)}$ 에게 발생하는 간섭을 제거되도록 빔형성을 한 예제이다. (c)의 세로로 빗금 친 부분은 간섭 제거로 인하여 간섭이 미치지 않는 영역이다. (b)에서 X_0 와 X_1 이 경쟁하여 X_1 이 전송 권한을 가질 경우는 X_0 는 전송할 수 없다. 하지만, X_0 가 X_2 와 $Y_{\pi(2)}$ 방향으로 발생하는 간섭을 억제하는 빔

형성을 이용하여 캐리어 센싱을 수행하면, X_0 는 X_1 의 백오프 카운터와 관계없이 항상 전송할 수 있다. 또한, 이 빔형성을 통하여 X_1 의 백오프 카운터 값이 X_0 보다 커서 X_0 가 전송하더라도, X_1 에게는 간섭이 느껴지지 않으므로 X_1 은 전송 권한을 얻을 수 있다. 따라서 인접한 AP들에게 간섭 제거하는 빔형성의 영향을 캐리어 센싱에 고려하여야 한다.

IV. 제안하는 방식

앞선 III장의 기존 방식의 문제점으로부터 결합 공간 분할 및 재사용 (JSDR: joint spatial division and reuse) 기법을 제안한다. 제안하는 방식은 전체 공간 차원 M 을 둘로 나누어 m 을 목표 STA에게 할당하고, $M-m$ 을 간섭 제거를 위한 영공간 (null space)에 할당한다. 목표 STA에게 할당한 공간 m 에 따라 다른 캐리어 센싱 한계값을 사용한다. 그리고 JSDR은 최적의 m 을 선택하여 목표 STA들에게 동시에 전송한다.

$\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_M$ 을 M 개의 M 차원 정규화된 직교 기저 벡터 (basis vectors)라고 하자. 본 논문에서는 무한히 많은 M 개 기저 벡터들 중 네트워크 용량을 최대화하는 M 개 기저 벡터 설계 방식은 다루지 않고, 주어졌다고 가정한다. 그러면, 제안하는 방식은 다음의 최적화 문제를 푸는 것에서 출발한다.

$$m^* = \max m \quad s.t. P_{CS}^m(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_M) \leq \eta_{th}^m, \quad 0 \leq m \leq M. \quad (6)$$

여기서, η_{th}^m 은 m 차원 공간 자원을 이용할 때의 캐리어 센싱 한계값이고, $P_{CS}^m(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_M)$ 는 $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_M$ 중 m 개의 벡터들을 이용하여 생성된 부공간 (subspace)을 이용하여 측정된 캐리어 센싱값 중 최솟값으로 다음과 같이 표현된다.

$$P_{CS}^m(\{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_M\}) = \min_{1 \leq i_1 < \dots < i_m \leq M} \left\| [\mathbf{v}_{i_1}, \dots, \mathbf{v}_{i_m}]^H \mathbf{r} \right\|^2 \quad (7)$$

여기서, \mathbf{r} 은 고효율 AP에서 수신한 $M \times 1$ 벡터이고, $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_M^2}$, $\{i_1, \dots, i_m\} \in \{1, \dots, M\}$ 으로 선택된 m 개의 기저 벡터들의 인덱스

스들이다.

m^* 개의 목표 STA에게 동시에 전송하기 위한 빔 형성 프리코더는 $M \times m^*$ 행렬 \mathbf{F} 이고, 이것의 열 공간 (column space)는 $\mathbf{v}_{i_1}, \dots, \mathbf{v}_{i_{m^*}}$ 으로 생성된 부공간에 존재하도록 설계한다. 제안하는 방식에서 η_{th}^m 을 결정하는 방식은 IV-A에서 설명하고, IV-B에서는 위의 최적화 문제 (6)와 (7)의 복잡도에 대하여 설명한다.

A. 차원별 캐리어 센싱 한계값

앞서 III 장에서 m 차원 공간 자원이 목표 STA에 할당되면 수신 SINR이 m 배 증가되는 것을 보였다. 이 특성을 이용하여 m 에 따른 캐리어 센싱 한계값을 구한다. 구하는 방식은 단일 안테나를 이용한 AP들의 최적의 캐리어 센싱 한계값에 대하여 다른 논문^[4]을 참고한다. 우선, 그림 3에서 가로로 빗금 친 간섭 영역의 넓이는 다음과 같다.

$$A_H(d_y, R_c) = \begin{cases} 0, & R_c \geq d_y(\delta^{1/\alpha} - 1), \\ \frac{bd_y^2\delta^{2/\alpha}}{2} + d_yR_c \left| \sin \frac{a}{2} \right| - \frac{aR_c^2}{2}, & d_y(\delta^{1/\alpha} - 1) \leq R_c < d_y(\delta^{1/\alpha} + 1), \\ \pi(d_y^2\delta^{2/\alpha} - R_c^2), & R_c < R_c < d_y(\delta^{1/\alpha} - 1). \end{cases}$$

여기서 $R_c = (mP/\eta_{th}^m)^{1/\alpha}$ 이고, δ 는 SINR 요구 조건으로 STA이 원하는 변조 및 코딩 방식 (Modulation and coding scheme, MCS)에 따라 달라지는 값으로 표 1에 나타나 있다.^[19] 그리고 a 와 b 는 다음과 같다.

$$a = 2 \cos^{-1} \left(\frac{R_c^2 - d_{i,j}^2(\delta^{2/\alpha} - 1)}{2d_{i,j}R_c} \right),$$

$$b = 2\pi - 2 \cos^{-1} \left(\frac{d_{i,j}^2(\delta^{2/\alpha} + 1) - R_c^2}{2\delta^{1/\alpha}d_{i,j}^2} \right).$$

m 차원의 공간 자원이 할당되었을 때, 최적의 캐리어 센싱 한계값은 $\eta_{th}^m = mP(t^*)^{-\alpha}$ 이며, t^* 은 $g'(t)/(1-g(t))^2 = 0$ 을 만족하는 근이고, $g(t)$ 는 다음과 같다.

$$g(t) = \frac{1}{\pi t^2} \int_0^{R_r} \frac{2r}{t^2} A_H(r, t) dr. \quad (8)$$

표 1. 단일 공간 스트림 사용 시 SINR 한계값과 20MHz 대역폭 사용 시 전송량

Table 1. The minimum required SINR values for a single spatial stream and the supported data rate with 20MHz bandwidth

MCS index	Modulation	Coding	Data rate (Mbps)	SINR threshold (dB) δ
0	BPSK	1/2	7.2	2
1	QPSK	1/2	14.4	5
2	QPSK	3/4	21.7	9
3	16QAM	1/2	28.9	11
4	64QAM	3/4	43.3	15
5	64QAM	2/3	57.8	18
6	64QAM	3/4	65.0	20
7	64QAM	5/6	72.2	25
8	256QAM	3/4	86.7	29

참고로, 위의 차원별 캐리어 센싱 한계값 η_{th}^m 는 환경에 따라 변하는 것이 아니므로, 한번 구해놓은 값을 저장하여 사용하면 된다. 따라서 높은 복잡도를 가지더라도 구현이 가능하다. 위 방식의 최적 특성 및 저 복잡도 구현은 논문^[4]에서 확인할 수 있다.

B. JS DR의 복잡도

차원별 캐리어 센싱 한계값 η_{th}^m 은 오프라인으로 구할 수 있지만, 식 (6)와 (7)의 최적화 문제는 매 캐리어 센싱 주기마다 수행하여야 하므로, 저 복잡도 구현이 필수적이다. 우선, 최적화 식 (7)을 살펴보자. 이 문제의 목표 함수 (objective function)은 다음과 같이 나타난다.

$$\|[\mathbf{v}_{i_1}, \dots, \mathbf{v}_{i_m}]^H \mathbf{r}\|^2 = \sum_{j=1}^m |\mathbf{v}_{i_j}^H \mathbf{r}|^2. \quad (9)$$

위 식으로부터, (i_1, \dots, i_m) 은 서로 독립적으로 간단한 정렬 방식으로 구할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 식 (7)을 풀기 위하여 사용되는 복잡도는 M 개의 복소수 곱셈, M 개의 덧셈과 M 개의 값을 오름차순으로 정렬하기 위한 복잡도가 필요하다. 따라서 식 (7)을 풀기 위한 총 복잡도는 $O(M \log M)$ 이다. 이제 식 (6)을 살펴보자. 최적의 m^* 을 구하기 위해서는 M 부터 시작하여 순차적으로 줄여 나가면서 구해야 한다. 하지만, 이미 앞서서 $|\mathbf{v}_i^H \mathbf{r}|^2, i = 1, \dots, M$ 를

구하였기 때문에, 더 이상 구할 필요가 없다. 따라서 추가적으로 필요한 복잡도는 최대 M 번의 비교 연산이 필요하다. 따라서 식 (6)를 계산하기위한 총 복잡도는 $O(M)$ 이다. 결과적으로 제안한 JS DR방식의 총 복잡도는 $O(M \log M)$ 이다.

V. 성능 평가

제안한 방식의 성능을 검증하기 위하여서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션을 위한 파라미터 들은 표 2에 정리되어 있다. STA들은 각 레가시 AP 들의 보로노이 (Voronoi) 영역에 하나씩 균일하게 배치하였다. 그리고 고효율 AP의 STA들은 고효율 AP의 보로노이 영역에 균일하게 배치하였다. 참고로, 이 모델은 더 많은 STA들이 존재하는데 라운드 로빈 방식으로 스케줄링하여 AP당 하나의 STA을 선택한 것과 동일하다. 제안한 JS DR 방식은 최대 안테나 수와 동일한 수를 동시에 전송할 수 있다. 하지만, JS DR 방식이 동시에 전송하는 STA의 수가 안테나의 수보다 적은 m^* 일 때, 라운드 로빈 방식으로 m^* STA를 선택한다. 참고로, 본 JS DR 방식은 스케줄링 알고리즘과 별도로 설계하였으므로, 스케줄링을 고려한 JS DR 설계는 본 논문에서는 제외한다. 그리고 JS DR에서 사용한 기저 벡터들은 이산 푸리에 변환 (Discrete Fourier transform) 행렬을 이용하였다. 즉, M 차원 M 개의 기저 벡터는

$$\mathbf{v}_i = \frac{1}{\sqrt{M}} [1, \omega^{i-1}, \omega^{i-1}, \dots, \omega^{(i-1)(M-1)}]^T \quad (10)$$

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Parameters	Setting
Tx power for legacy AP	20dBm
Tx power for HEW AP	20dBm
Carrier sensing threshold of legacy AP, η_{th}	-82dBm~-62dBm
Network size	100m x 100m
# of legacy APs	5,10,20
# of STAs for legacy APs	5,10,20
# of STAs for HEW AP	16, 32, 64
# of antennas of HEW AP	16, 32, 64
$\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_M$	$M \times M$ DFT matrix

이고, $\omega = e^{-j2\pi/M}$ 이다. 다중 안테나 채널 환경은 식 (1)과 같이 원형산란체 모형을 사용한다. 이 때, 원형 산란체의 거리는 5m로 한다.

그림 4는 기존의 방식과 제안한 방식의 네트워크 전송 용량을 캐리어 센싱 한계값에 따라 나타냈다. 고효율 AP의 안테나 수는 16개이다. 고효율 AP가 IEEE 802.11의 기반의 캐리어 센싱 방식을 사용하면, 레가시 AP의 수가 5개일 때 60bps/Hz, 10개일 때 110bps/Hz, 20개일 때 130bps/Hz 정도 최대이다. 하지만, 고효율 AP가 제안한 JS DR을 사용하면, 레가시 AP의 수가 5개일 때 140bps/Hz로 133%, 10개일 때 170bps/Hz로 54%, 20개일 때 38% 정도 증가를 확인할 수 있다.

그림 5는 안테나의 증가에 따라 제안한 JS DR 방식의 성능을 보여준다. 레가시 AP의 수는 20개로 고정하였다. 안테나는 16개, 32개, 64개로 증가시켰다. 제안한 방식은 고효율 AP의 안테나수가 16개일 때 180bps/Hz, 32개일 때 300bps/Hz, 64개일 때 430bps/Hz이다.

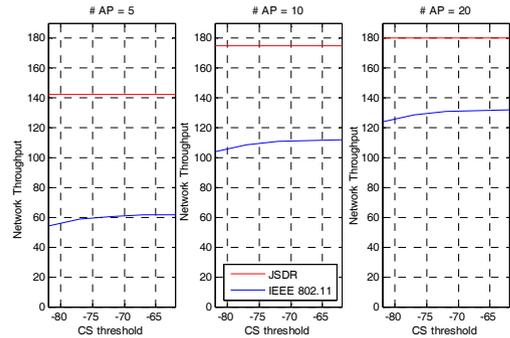


그림 4. 캐리어 센싱 한계값에 따른 제안한 JS DR 성능
Fig. 4. Performance of the proposed JS DR (carrier sensing threshold)

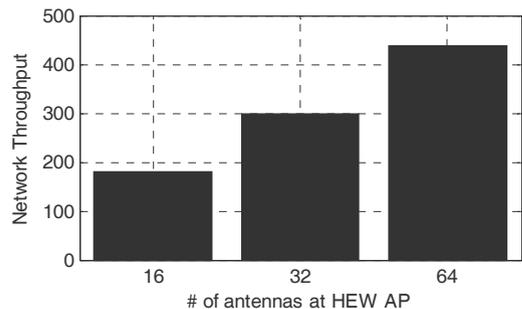


그림 5. 안테나 수에 따른 제안한 JS DR 기법 성능
Fig. 5. Performance of the proposed JS DR (# of antennas at HEW AP)

표 3. 고효율 AP의 전송 권한 획득 확률
Table 3. Access Probability of HEW AP

		# of antennas at HEW AP		
		16	32	64
IEEE 802.11	-82dBm	22%		
	-72dBm	37%		
	-62dBm	41%		
JSDR	86%	97%	99%	

끝으로 고효율 AP가 IEEE 802.11기반 캐리어 센싱을 사용할 때 전송 권한을 얻을 확률과 제안한 JSDR을 사용했을 때 전송 권한을 얻을 확률을 표 3에 나타냈다. 레가시 AP의 수는 20개로 고정하였다. IEEE 802.11기반 캐리어 센싱은 약 40% 정도의 확률로 고효율 AP가 동작하였으나, 제안한 JSDR은 안테나 수가 64개일 때, 높은 확률로 항상 동작하는 것을 확인 할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 최근 관심을 불러일으키고 있는 차세대 무선랜 시스템에서 AP와 STA들이 밀집되어 있는 환경에서 기존의 캐리어 센싱 기반의 공간 재사용 기법을 사용하는 것은 비효율적임을 보였으며, 대용량 MIMO의 다중 공간 자원을 이용하여 공간 재사용을 극대화하는 캐리어 센싱 기법으로 결합 공간 자원 및 재사용 기법을 제안했다. 제안한 방식은 공간 차원을 간섭을 억제하는 부분과 캐리어 센싱 및 전송을 위한 부분으로 나누어 사용한다. 제안한 방식은 램덤 네트워크 환경에서 기존의 IEEE 802.11에 정의된 캐리어 센싱 기법과 비교하여 133% 이상의 성능 이득을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

본 논문에서 제안한 결합 공간 자원 및 재사용 기법은 주어진 기저 벡터와 라운드 로빈 방식의 스케줄링을 이용하였으므로, 네트워크 전송 용량을 최대화하기 위한 최적의 기저 벡터 선택 방식과 사용자 선택 및 스케줄링 방식에 대하여 추가적인 연구가 필요하다. 실제 구현을 통하여 네트워크 용량 증대를 검증하여 대용량 MIMO를 사용하는 차세대 무선랜 시스템 표준에 사용할 수 있을 것이다.

References

[1] C. X. Wang, et al., "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless

communication networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 122-130, Feb. 2014.

[2] Informa/Mobidia, "Understanding the role of managed public Wi-Fi in today's smartphone user experience: A global analysis of smartphone usage trends across cellular and private and public Wi-Fi networks," Feb. 2013.

[3] IEEE 802.11, Part 11: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE standard for information technology telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirement*, 1999.

[4] Y. Zhu, Q. Zhang, Z. Niu, and J. Zhu, "On optimal QoS-aware physical carrier sensing for IEEE 802.11 based WLANs: theoretical analysis and protocol design," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 7, no. 4, pp. 1369-1378, Apr. 2008.

[5] F. Rossetto and M. Zorzi, "Enhancing spatial reuse in ad hoc networks by carrier sense adaptation," in *Proc. MILCOM 2007*, pp. 1-6, Orlando, USA, Oct. 2007.

[6] L. Fu, S. C. Liew, and J. Huang, "Effective carrier sensing in CSMA networks under cumulative interference," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 12, no. 4, Apr. 2013.

[7] X. Cheng, et al., "Communicating in the real world: 3D MIMO," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 21, no. 4, pp. 136-144, Aug. 2014.

[8] Z. Wen, B. Li, Z. Luo, D. Chen, S. Wang, and W. Xu, "Discussion on massive MIMO for HEW," IEEE 802.11-13/104r2, Sept. 2013.

[9] E. G. Larsson, F. Tufvesson, O. Edfors, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.

[10] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40-46, Jan. 2013.

- [11] A. Adhikary, J. Nam, J. Y. Ahn, and G. Caire, "Joint spatial division and multiplexing—the large-scale array regime," *IEEE Inf. Theory*, vol. 59, no. 10, pp. 6441-6463, Oct. 2013.
- [12] H. Choi, "Carrier sensing multiple access with collision resolution (CSMA/CR) protocol for next-generation wireless LAN," *J. KICS*, vol. 38A, no. 01, pp. 33-43, Jan. 2013.
- [13] W. Lim, D. Kim, Y. Suh, and D. Kwon, "A contention window adjustment algorithm for improving fairness between uplink and downlink in IEEE 802.11 WLANs," *J. KICS*, vol. 36, no. 4, pp. 329-336, 2011.
- [14] E. G. Lee and S. H. Rhee, "A token-ring-based MAC protocol in IEEE 802.11 WLANs," *J. KICS*, vol. 39B, no. 01, pp. 38-40, Jan. 2014.
- [15] B. Alawieh, Y. Zhang, C. Assi, and H. Moustah, "Improving spatial reuse in multihop wireless networks - a survey," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 3, pp. 71-91, 3rd Quarter, 2009.
- [16] C. Thorpe and L. Mutphy, "A survey of adaptive carrier sensing mechanisms for IEEE 802.11 wireless networks," *IEEE Commun. Survey & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1266-1293, 3rd Quarter, 2014.
- [17] M. Z. Sian and M. Krunz, "An overview of MIMO-oriented channel access in wireless networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 63-69, Feb. 2008.
- [18] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of wireless communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [19] E. Perahia and R. Stacey, *Next generation wireless LANs: 802.11n and 802.11ac*, Cambridge Univ. Press, 2013.

최 경 준 (Kyung Jun Choi)



2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 졸업
 2010년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 석박사통합과정
 <관심분야> Massive MIMO, 협력통신, 비직교 다중 접속

김 경 준 (Kyung Jun Kim)



2006년 2월 : 경희대학교 전자전파공학과 졸업
 2008년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 석사
 2008년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 학사과정

<관심분야> OFDM 시스템, 채널 추정, 추정 및 검파 이론

김 광 순 (Gwang Soon Kim)



1994년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업
 1996년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 1999년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
 1999년 3월~2000년 3월 : Dept.

ECE, UC San Diego, 박사후연구원
 2000년 4월~2004년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
 2004년 3월~2009년 2월 : 연세대학교 전기전자공학부 조교수
 2009년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 부교수
 <관심분야> 통신이론, 변복조 방식, 다중사용자/다중셀 다중안테나 시스템, 애드혹 및 이중 셀룰러 네트워크의 용량 및 계층간 최적화