

# IEEE 802.11 무선망에서 기회적 채널 전환을 통한 다중사용자 다이버시티 이득 향상 (Delay Analysis under Dynamic Traffic in Network)

함성일<sup>†</sup>      김중권<sup>\*\*</sup>  
(Seong-il Hahm)      (Chong-kwon Kim)

**요약** IEEE 802.11 무선랜에서 다중사용자 다이버시티 기법 위에 채널 다이버시티 기법을 적용함으로써 다중사용자 다이버시티 기법이 얻을 수 있는 최대 이득보다 더 큰 이득을 추구한다. 이를 위해 본 논문에서는 기존 다중사용자 다이버시티 기법 위에 수행될 기회적 채널 전환 기법을 제안하고 단말기의 수, 채널 수, 채널 전환 지연 시간, 사용자의 평균 채널 상태 등을 변경해가면서 성능 평가를 수행한다.

키워드 : IEEE 802.11 무선랜, 다중사용자 다이버시티, 기회적 채널 전환

**Abstract** Channel diversity is exploited to increase multiuser diversity gains in IEEE 802.11 WLANs. To this end, we propose an opportunistic channel switching method and evaluate this with different number of stations, number of channels, switching latency, and the average channel condition of stations.

**Key words** : IEEE 802.11 WLAN, multi-user diversity, opportunistic channel switching

## 1. 서론

무선 채널의 가장 대표적인 특징중의 하나는 페이딩(fading)이다. 페이딩이란 송신기에서 출발한 무선 신호들이 각각 서로 다른 경로를 거치면서 다른 위상(phase)을 가지고 수신기 안테나에 도달하는데 이런 신호들이 합해진 신호의 세기는 서로 다른 경로를 거친 신호들의 위상에 따라서 평균에 비해 작아질 수도 커질 수도 있다. 이런 현상을 다중경로(multipath) 페이딩이라 한다[1]. 전통적으로 페이딩으로 인해 발생하는 신호 세기의 변동(fluctuation)은 안정적인 시스템을 위해 극복할 대상이었다.

최근에 들어서 패킷 데이터 통신용 셀룰러 망을 중심으로 다중경로 페이딩을 극복할 대상에서 오히려 적극적으로 활용할 대상으로 생각하는 패러다임 전환(paradigm shift)이 이루어졌다. 이 중심에 서있는 것이 다중사용자 다이버시티(multiuser diversity)이다. 기지국이 여러 사용자들에게 보낼 데이터를 가지고 있는 상황에서 기지국에서부터 각 사용자까지의 무선 채널이 독립인 페이딩을 겪는다면 특정 시간에 어떤 사용자는 좋은 다운링크 채널 상태를 보이는 반면 다른 사용자는 그렇지 못할 수 있다. 이럴 경우 기지국은 좋은 채널 상태를 보이는 사용자를 우선적으로 서비스하는 방법을 통해서 처리율을 극대화할 수 있다. 물론 사용자들간의 공정성(fairness)를 감안해서 사용자들 간의 서비스 순서가 결정되어야 할 것이며 이를 기회적 스케줄링(opportunistic scheduling)이라 한다. 이런 기회적 스케줄링 기법을 채택한 대표적인 시스템이 1xEVDO이다[2].

IEEE 802.11[3] 무선랜에서도 이런 시도는 이어졌다. 하지만 기회적 스케줄링을 적용하기 위해서는 송신기는 매우 짧은 기간마다 모든 수신기로부터 다운링크 채널 상태를 보고받아야만 하는데 무선랜에는 이런 메커니즘이 없다. 참고로 1xEVDO의 단말기는 1.67 ms 마다 채널 상태를 기지국에 전용 채널을 통해 보고한다[4]. 무선랜의 이런 단점에도 불구하고 여러 방법들이 제안되었다. 제안된 방법들은 모두 채널 탐침(probing)을 위해

· 이 논문은 2009년도 두뇌한국21사업과 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 육성·지원사업(IITA-2009-C1090-0902-0006)의 연구결과로 수행되었음

<sup>†</sup> 학생회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부  
siham@popeye.snu.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 종신회원 : 서울대학교 컴퓨터공학부 교수  
ckim@popeye.snu.ac.kr

논문접수 : 2008년 7월 30일

심사완료 : 2009년 2월 10일

Copyright©2009 한국정보과학회: 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 정보통신 제36권 제3호(2009.6)

RTS/CTS를 사용한다. MAD[5]라는 방법에 따르면 액세스 포인트(Access Point, AP)는 단말기들 중에 오직 3 개를 선택하여 RTS에 그들의 주소를 기록한 후에 전송하면 선택된 단말기들만이 RTS에 기록된 순서대로 자신의 채널 상태를 CTS에 기록 후에 AP에게 전송한다. OSMA[6]라는 방법은 선택된 4 개의 단말기의 주소를 RTS에 기록하여 전송하면 선택된 단말기들은 채널 상태가 미리 정해진 임계치(threshold)를 넘을 경우에만 정해진 시간에 CTS로 응답하고 그렇지 않으면 응답하지 않는다. 두 가지 방법은 모두 탐침 대상 단말기의 수가 증가할수록 탐침 비용(probing overhead)이 커지는 구조이기 때문에 그 수를 제약하였다. 하지만 일부 단말기들의 채널 상태만 알고서는 다중사용자 다이버시티 이득을 최대화할 수는 없다. 이를 해결하기 위해 WDOS[7]라는 방법에서는 AP가 RTS를 broadcasting을 하면 모든 단말기들 중에서 자신의 평균 채널 상태에 비해 현재 채널 상태가 가장 좋은 단말기만이 CTS를 응답한다. 이런 탐침 구조는 탐침 대상 단말기 수에 무관하게 탐침 비용을 최소화할 수 있기 때문에 다중사용자 다이버시티 이득을 주어진 환경 내에서는 최대화할 수 있다. 이런 이유로 인해 본 논문에서는 WDOS를 기본 다중사용자 다이버시티 기법으로 사용한다.

다중사용자 다이버시티 이득을 더 극대화시킬 수는 없는가? [8]에 따르면 페이딩으로 인한 신호 변동 폭이 클수록 변화 주기가 빨라수록 다중사용자 다이버시티 이득은 증가한다. 이를 위해서 [8]에서는 다수의 송신 안테나를 이용하여 같은 신호를 전송하는데 각 안테나의 전송 파워 및 신호 위상은 임의(random)로 설정하여 수신기에서 겪을 페이딩에 의한 신호 변동 폭을 키우고 변화 주기를 빠르게 한다. 이런 기법을 기회적 빔형성(opportunistic beamforming)이라 한다. IEEE 802.11 무선랜에도 이를 구현한다면 다중사용자 다이버시티 이득을 높일 수 있으나 이를 위해서는 AP에 추가적인 안테나 및 관련 하드웨어가 필요하여 추가적인 비용이 발생한다.

본 논문은 채널 다이버시티를 통해 다중사용자 다이버시티 이득을 더 극대화시킬 수 있는 방안에 대한 연구이다. 서로 다른 장소에 위치해있는 단말기들은 AP와의 다중경로가 상이하기 때문에 독립적인 페이딩을 겪는다. 이런 무선 채널의 독립성 때문에 안테나 다이버시티 및 다중사용자 다이버시티 등이 무선 통신의 성능 향상에 적극 활용될 수 있었던 것이다. 하지만 한 단말기가 장소는 그대로인 채 채널만 변경할 경우는 어떠한가? 예를 들어, IEEE 802.11a[9]에서 반송주파수(carrier frequency)가 5.18 GHz인 첫 번째 채널을 생각해보자.

이 주파수의 파장은 5.79 cm이고 이 대역의 신호가 40 m를 진행하면 690.85 번 진동한다. 만약 채널을 바로 인접한 주파수 대역인 5.2 GHz로 바꾼다면 같은 거리를 이동하면서 693.24 번 진동한다. 즉, 5.2 GHz 대역 신호의 위상이 5.18 GHz 대역 신호의 위상보다 2.4 배 더 앞서있는 것이다. 이렇듯 바로 인접한 채널 간에도 같은 거리를 이동했음에도 불구하고 위상 차이는 현저하게 발생할 수 있다. 파장이 짧은 대역일수록 각 채널에서 보이는 페이딩은 독립적이며 반대로 파장이 길수록 그렇지 못하다. 이런 이유로 인해 본 논문에서는 2.4 GHz 대역의 무선랜 표준인 802.11b/g[10,11] 대신에 5 GHz 대역의 802.11a를 적극 활용한다. 이렇듯 독립이든 아니든 간에 채널 마다 상이한 페이딩이 나타나는 현상을 채널 다이버시티라 할 수 있다.

본 논문의 학문적 성취는 두 가지이다. 첫째, 다중사용자 다이버시티 기법 위에 채널 다이버시티 기법을 적용함으로써 다중사용자 다이버시티 기법만을 활용해서 얻을 수 있는 이득의 한계를 넘어서 무선랜의 성능을 향상시켰다. 제안된 기법을 WDOS+라 하며 이런 연구는 우리가 아는 한 처음이다. 둘째, [8]에서 제안된 방법과 같이 추가적인 하드웨어가 필요하지 않고 단지 기존 IEEE 802.11 무선랜이 이미 보유한 기능인 채널 전환 기능을 활용하기 때문에 구현이 용이하다.

이 후 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무선랜에서 채널 전환과 관련된 연구들과 본 논문에서 기본 다중사용자 다이버시티 기법으로 채택한 WDOS[7]를 알아본다. 3장에서는 다중사용자를 대상으로 한 채널 전환의 가능성을 살펴봄으로써 본 논문에 동기부여를 한다. 4장은 WDOS+의 채널 전환 기법, 임계값 설정 방법, 채널 전환 구현 방법을 설명하고 5장에서는 제안된 방법의 모의실험 결과를 보인다. 마지막으로 6장에서 결론으로 본 논문을 맺는다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 채널 전환(Channel switching)

채널 호핑(hopping) 혹은 채널 전환은 무선망에서 다양한 목적을 위해 연구되어 왔다. 먼저 [12-14]에서는 채널 상태가 미리 주어진 임계값보다 클 때까지 채널을 변경하는데 임계값을 너무 높게 잡을 경우 빈번한 채널 전환으로 인한 오버헤드가 증가하며 반대로 너무 낮게 잡으면 채널 다이버시티를 충분히 활용하지 못하게 된다. 따라서 이런 상충관계 하에서 최대 처리율을 얻기 위해 최적정지규칙(optimal stopping rule) 혹은 유사 알고리즘들이 제안되었다. 하지만 이 방법들은 모두 하나의 링크에 적용되는 것으로서 무선랜과 같이 다수의

단말기들이 하나의 AP를 공유하는 망구조에서는 적용하기 힘들다. 뿐만 아니라 이들은 어떻게 채널을 변경할 것이며 이 때 추가로 소요되는 비용에 대해서도 고려하지 않았다. [15]는 정적인 채널 할당으로 인해 발생하는 AP들 간의 처리율 불공평성을 해결하고자 동적인 채널 호핑 방안을 제시하였다. [16]과 [17]은 간섭자(interferer) 또는 악의적 공격자로부터의 피해를 줄이기 위해 채널 호핑을 채택하였다. 이는 CDMA의 기본적인 원리와 일치한다.

채널 전환에 대한 표준화 작업도 있다. IEEE는 무선 랜이 5 GHz 대역 주파수를 사용함에 있어서 레이다가 사용하는 주파수 대역을 피해서 사용할 수 있도록 802.11h [18]라는 표준안을 채택하였다. 물론 이 표준안은 레이다 신호를 회피하는 용도 이외에도 5 GHz 대역의 스펙트럼을 보다 효율적으로 사용하는데도 활용될 수 있다. 이 표준안은 채널 전환 시점을 TBTT(target beacon transmission time)로 제한하고 있다. 하지만 본 논문에서 제안하는 채널 전환의 가장 큰 특징은 일명 기회적 채널 전환(opportunistic channel switching)으로 채널 전환 시점이 주기적이거나 사전에 미리 정해지는 것이 아닌 단말기들의 채널 상황에 따라 실시간으로 결정되는 것이 특징이기 때문에 802.11h를 활용하기는 어렵다.

## 2.2 기본 다중사용자 다이버시티 기법(WDOS)

WDOS[7]는 채널 탐침 오버헤드와 다중사용자 다이버시티 이득 간의 상충 관계를 극복하기 위해서 경쟁에 기반한 CTS 응답 기법을 채택하였다. AP는 modified RTS(MRTS)를 모든 단말기들에게 방송한다. 각 단말기는 CTS로 응답하기 전에 랜덤 백오프 시간을 기다리는데 이 백오프 값은 오직 상대적인 채널 상태(즉, 자신의 평균 채널 상태에 비해 현재 채널 상태)에 따라서만 결정되며 채널 상태가 좋은 수신자가 더 적은 백오프 값을 갖는다. 편의상 이후의 모든 채널 상태는 상대적인 채널 상태를 말하기로 한다. 따라서 모든 단말기들 중에 채널 상태가 가장 좋은 단말기가 가장 먼저 CTS를 응답하게 되고 AP는 이 단말기에게 데이터를 보냄으로써 다중사용자 다이버시티 이득을 높일 수 있다. 나머지 단말기들은 가장 먼저 전송된 CTS를 듣고 자신의 CTS 전송을 포기한다. 만약 두 개 이상의 단말기의 백오프 시간이 같으면 CTS 충돌이 발생하게 되는데 이런 충돌 가능성을 최소화 시키는 것이 채널 탐침 오버헤드를 줄이는 방법이다. 우선, 각 단말기는 AP로부터 전송된 패킷들의 신호세기를 측정하여 신호세기 분포를 추정한다. 이 분포를  $L$  구간으로 나누는데 각 구간은 같은 넓이(확률)를 갖도록 한다. 채널 상태가 가장 좋은 구간을 첫 번째, 가장 나쁜 채널 구간을  $L$  번째 구간이라 하자.

이 때 AP로부터 전송된 MRTS의 신호세기가  $i$  번째 구간에 속한다면 CTS 백오프 값은 다음 식과 같이 결정된다.

$$backoff = ((i-1) \cdot M + rand(0, \dots, M-1) \cdot T_{slot}), \quad (1)$$

$T_{slot}$ 은 하나의 슬롯 시간으로 802.11a의 경우 9 us가 된다. Rand()은 괄호 안의 숫자 내에서 임의의 값을 선택하는 함수이다. 또한, 변수  $M$ 은 두 개 이상의 단말기가 같은 구간에 속할 경우 충돌을 방지하기 위해서 CTS 백오프 값에 임의성(randomness)를 추가하는 역할을 한다. WDOS의 가장 큰 특징은 단말기 수  $N$ 과 무관하게 채널 탐침 오버헤드를 일정하게 유지할 수 있는 것으로 그 평균값이 8 슬롯에 그친다[7]. 이를 가능케 한 가장 큰 원리는 단말기 수에 비례하여  $L$  값을 증가시킴으로써 CTS 충돌 가능성을 항상 일정 수준 이하로 유지하는 것이다. 본 논문에서는 [7]에서와 같은  $L$ 은  $3 \cdot N$ ,  $M$ 은 2를 사용한다.

## 3. 동기 부여

채널 전환한 후에 더 좋은 채널 상태를 얻을 수 있는 확률은 싱글 링크만을 대상으로 하는 경우와 다수의 링크를 대상으로 하는 경우가 크게 다르다. 이를 계산하기 위해 2.2장에서 언급한  $L$  구간으로 나뉜 채널 상태 분포를 활용한다. 각 단말기가 각 채널마다 독립적인 페이딩을 겪을 때  $N$ 개의 단말기들 중 가장 좋은 채널 상태가  $i$  번째 구간에 속한다고 하자. 이 때 채널 변경 후 가장 좋은 채널 상태가  $[1, i-1]$  구간에 속할 확률은(즉, 채널 전환 후 더 좋은 채널 상태를 보이는 경우) 다음과 같다.

$$P_{better} = 1 - ((L-i+1)/L)^N. \quad (2)$$

그럼 1에서 보는 것과 같이 싱글 링크만 대상으로 한 경우( $N=1$ ), 채널 변경 후 채널 상태가 더 좋아질 확률은 현재 채널 상태가 좋을수록(즉, 구간을 나타내는  $i$  값이 작아질수록) 선형적으로 줄어든다. 하지만 다중 단말기들을 대상으로 할 경우, 그 수가 많을수록 이 확률은 비선형적인 모습을 띄면서 그림 1과 같이  $i$  값이 작아져도 완만하게 감소하는 모습을 보인다. 이렇기 때문에 다중사용자 다이버시티 기법에 채널 전환 기법을 적용하면 더 좋은 채널을 활용할 수가 있어서 더 큰 처리율 이득을 얻을 수 있다.

## 4. WDOS+

### 4.1 프로토콜(Protocol)

WDOS+는 기본적으로 WDOS 위에서 동작한다. 먼저, AP가 WDOS 프로토콜에 따라 단말기들 중에서 채널 상태가 가장 좋은 단말기를 선택하고 그 단말기에

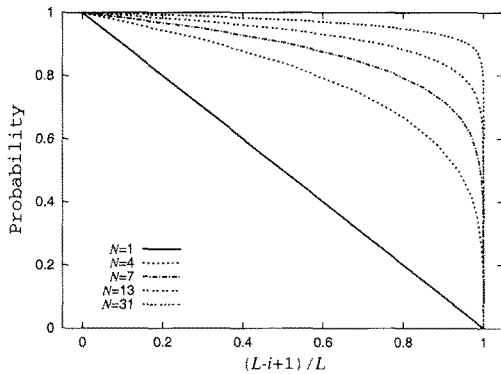


그림 1 채널 변경 시 더 좋은 채널 상태를 만날 확률

데이터를 전송한다. 데이터 전송 후에 해당 단말기의 하향 링크의 채널 상태가 미리 정해진 임계값보다 작은 경우 채널 전환을 수행한다. 임계값은 WDOS에 의해서 선택된 단말기에 따라서 달라진다.

다음의 각 절에서는 왜 데이터 전송 후에 채널 전환 여부를 결정하는지, 임계값은 어떻게 결정하는지, 그리고 실제적으로 채널 전환은 어떤 식으로 수행하는지에 대해서 설명한다.

#### 4.2 지연된 채널 전환(Delayed channel-switching)

최적의 채널을 찾기 위해 수행하는 채널 전환은 크게 채널 탐침 비용과 채널 전환 비용을 요구한다. 채널 탐침 비용의 경우 보통 RTS/CTS 전송으로 발생하는데 다중사용자 다이버시티 기법에 따라 조금씩 다르다. MAD[5]의 경우 3번의 RTS/CTS 전송 시간이고, OSMA[6]와 WDOS[7]의 경우 한번의 RTS/CTS 전송 시간 외에 CTS 전송 전에 기다리는 지연 시간이 추가된다. OSMA는 추가 지연시간을 줄이기 위해 최대 탐침할 수 있는 단말기 수를 4대로 제한하는데 비해 WDOS의 경우 평균 8 타임슬롯의 추가비용으로 이론적으로 무한대의 단말기들을 대상으로 채널 탐침을 수행할 수 있다.

채널 전환 비용의 경우 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째 AP와 단말기들이 같은 채널로 이동하기 위해 AP가 옮겨갈 채널을 사전에 단말기들에게 알려줘야 한다. 예를 들어 이를 위해 802.11h[18]에서는 AP가 별도의 제어 프레임을 전송한다. 두 번째는 채널 전환하는데 소요되는 시간이다. 802.11[3]은 하드웨어가 물리적으로 채널 전환하는데 소요되는 시간을 224 us 내로 제한하고 있다. 하지만 무선랜 카드를 구동하는 디바이스 드라이버에 추가적인 지연 시간이 추가될 수 있는데 [15]에 의하면 Intel 칩셋의 경우 200 us로 가장 짧고 Prism 2.5 칩셋의 경우 20 ms로 가장 길다. 본 논문은 224 us, 2.24 ms, 22.4 ms의 세 가지 채널 전환 지연에 대하여

WDOS+의 성능 평가를 수행한다.

이렇듯 다중사용자 다이버시티 기법에서 요구하는 채널 탐침 비용과 채널 전환 시 발생하는 비용이 크기 때문에 이를 최대한 줄이기 위해서 WDOS+는 지연된 채널 전환(delayed channel-switching) 기법을 사용한다. 즉, 채널 탐침 후에 선택된 단말기에게 데이터를 전송하고 채널 전환은 해당 단말기의 하향 링크 상태를 임계값과 비교하여 작을 경우에 수행한다. 이런 접근 방법의 또 다른 뒷받침으로는 WDOS를 통하여 선택된 단말기의 채널 상태는 모든 단말기 중에 가장 크기 때문에 채널 전환을 하지 않더라도 다중사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있기 때문이다.

[12-14]의 경우 채널 상태가 주어진 임계값보다 작을 경우 데이터 전송 없이 채널 전환을 수행하고 조건이 맞는 채널을 찾은 후에야 비로서 데이터를 전송한다. 이들의 경우 모두 하나의 무선 링크를 대상으로 한 기법이기 때문에 채널 탐침 비용은 한번의 RTS/CTS 전송 시간으로 다중사용자 다이버시티 기법들보다 적으며 또한 WDOS+와 다르게 임계값보다 작은 채널 상태에서 데이터를 전송함으로써 얻는 이득도 없다.

지연된 채널 전환 기법을 적용할 경우 채널 측정 시점과 채널 전환 시점이 한 개의 데이터 프레임 전송 시간 정도 차이가 난다. 하지만 본 논문에서는 도플러 주파수가 10 Hz 이내인 실내 환경을 가정하는데 한 개의 데이터 프레임 전송 시간에 비해 상관시간(coherence time)이 수십에서 수백 배 크기 때문에 지연된 채널 전환 기법을 적용하는데 무리는 없다.

#### 4.3 채널 전환 임계값(Channel-switching threshold)

WDOS에서 상대적인 채널 상태 값을 사용하는 것처럼 WDOS+의 채널 전환 임계값도 상대적 채널 상태 값을 사용한다. 따라서 어느 단말기가 선택되었는지에 따라서 채널 전환 임계값도 달라진다. 단말기  $j$ 가 선택되었다면 임계값  $q_{th}$ 은 다음과 같다.

$$q_{th} = -\bar{q}_j \cdot \ln(\eta). \quad (3)$$

여기서  $\bar{q}_j$ 는 단말기  $j$ 의 평균 채널 상태이고  $\eta$ 는 실질적인 임계값을 결정하는 변수이다. 앞으로는  $q_{th}$ 와  $\eta$ 는 서로 교환되어서 사용된다.

지연된 채널 전환이 비용을 완전히 없애주는 것은 아닌 단지 그 양을 줄여주는 것뿐이기 때문에 여전히 채널 탐침 및 채널 전환 비용과 다중사용자 다이버시티 및 채널 다이버시티 이득 간에 상충관계는 성립한다. 따라서 처리율을 최대화하는 최적 임계값이 존재하며 본 논문에서는 모의실험을 통해 이 값이 단말기의 수, 채널 수, 채널 전환 지연 시간, 사용자의 채널 특성에 따라서 어떻게 변하는 지 확인할 것이다.

#### 4.4 채널 전환 구현

AP와 모든 단말기들이 같은 채널로 호핑하기 위해서는 AP가 사전에 새로운 채널을 단말기들에게 알려줘야만 하는데 위에서 언급한대로 이는 추가적인 비용을 발생시킨다. 이런 비용을 없애기 위해 채널 전환을 결정한 AP는 데이터 프레임에 새로운 채널 번호를 적어서 보내고 이 데이터를 수신한 단말기는 ACK 프레임에 그 채널 번호를 적어서 응답한다. 단, 여기서 주고받는 데이터와 ACK은 채널을 변경하기 전 채널에서 전송되어진다. 신뢰성을 높이기 위해서 AP는 ACK을 수신한 후에만 비로서 새로운 채널로 이동하며 ACK을 보낸 단말기는 ACK 전송 직후에 나머지 단말기들은 선택된 단말기가 보낸 ACK을 들은 후에 즉시 새로운 채널로 이동한다. 만약 AP가 ACK을 듣지 못하면 채널 전환은 취소된다. 하지만 실제 무선랜 환경에서는 ACK 프레임도 손실될 수 있기 때문에 일부 단말기들이 AP와 같은 채널로 이동하는데 실패할 수 있다. 이때 해당 단말기들은 능동적 스캐닝(active scanning)을 통해 AP가 어느 채널에 동작하는 지를 검색한 후에 그 채널로 이동한다. 단, 본 논문의 모의실험에서는 순수 다이버시티 이득을 더 조명하기 위해 ACK 손실은 발생하지 않는다고 가정하였다. 이런 경우 AP가 ACK을 못들을 경우란 선택된 단말기가 데이터를 성공적으로 수신하지 못함을 의미하기 때문에 ACK을 보내지 않게 되며 따라서 모든 단말기들도 채널 전환을 수행하지 않는다.

새로운 채널 번호를 데이터 및 ACK 프레임에 포함시키기 위해서 새로운 필드가 꼭 필요한 것은 아니다. 프레임 제어 필드(frame control field) 내에 타입 비트가 '11'이면 서브타입 4 비트는 현재 비워져 있는 상태이다[3]. 이곳을 이용하면 표준의 프레임 포맷을 그대로 유지하면서 효과적으로 단말기들에게 새로운 채널을 알릴 수 있다.

### 5. 성능 평가

성능 평가의 대상 시스템은 IEEE 802.11a이며 AP는 항상  $N$ 개의 단말기들에게 보낼 데이터가 있고 모든 단말기들의 평균 채널 상태는 같다고 가정한다. 도플러 주파수(Doppler frequency)는 1 Hz로 설정하여 이동성이 적은 실내 무선랜 환경의 특징을 반영하였다. 기본적으로 WDOS는 장기적 접근 공평성(long-term access fairness)을 만족시키고[7] 또한 식 (3)과 같이 상대적인 채널 상태를 채널 전환 임계값으로 사용하기 때문에 WDOS+ 또한 장기적 접근 공평성을 만족시킨다. 따라서 이번 장에서는 다중사용자 다이버시티 이득과 채널 다이버시티 이득이 동시에 반영된 처리율을 주요 성능 척도로 삼는다. 단말기의 수, 변경 가능한 채널의 수, 체

널 전환 지연, 및 단말기의 평균 채널 상태가 변할 때 처리율은 어떻게 변하는 지, 그 때의 최적 임계값은 얼마인 지 관찰한다.

그림 2는 모든 단말기들의 평균 채널 상태가  $-72$  dBm 이고 채널 전환 지연 시간이 224 us일 때 단말기의 수  $N$ 과 채널의 수  $C$ 의 변화에 따른 WDOS와 WDOS+의 최대 처리율을 보여준다. [7]에 의하면 같은 환경에서 WDOS는 MAD[5]나 OSMA[6]보다  $N=31$ 일 때 34% 정도 높은 처리율을 보여준다. 하지만 WDOS+는 더 나아가 채널 수가 3, 4, 8, 12일 때 WDOS보다 각각 8%, 11%, 13.5%, 13.5% 더 높은 처리율을 얻는다. MAD와 OSMA에 비하면 그 증가율은  $C=12$ 일 때 52.14%에 달한다. 이는 다중사용자 다이버시티 기법을 통해 처리율을 극대화시켰음에도 불구하고 여기에 채널 다이버시티 기법을 추가함으로써 그 한계를 극복할 수 있음을 보이고 있다. 변경 가능한 채널 수가 많아질수록 채널 다이버시티 이득 또한 증가하지만 그 수가 어느 정도 되면 (즉,  $C > 8$ ) 더 이상 증가하지 않음을 확인할 수 있다. 또한,  $N=1$ 일 때는 모든 경우에서 가장 많이 (WDOS에 비해 20% 이상) 처리율이 증가하는데 이는  $N=1$ 일 때는 다중사용자 다이버시티 이득이 전혀 없다가 채널 다이버시티를 적용함으로써 그 이득이 배가되어 그렇다.

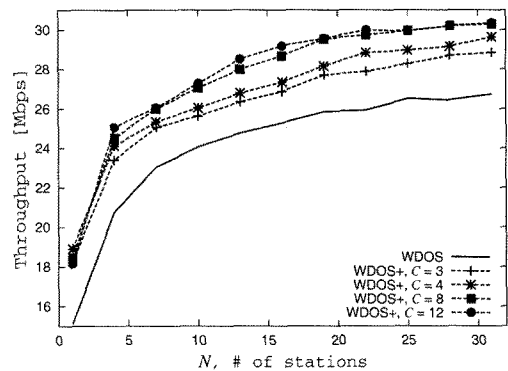


그림 2 단말기의 수  $N$ 과 변경 가능한 채널의 수  $C$ 에 대한 처리율 변화

그림 2의 최대 처리율을 구할 때 사용된 임계값 즉, 최적 임계값은 그림 3에서 보여진다. 전체적으로 단말기의 수가 증가할수록 최적 임계값은 지수적으로 감소함을 확인할 수 있다. 또한, 채널 수가 많아질수록 최적 임계값이 조금씩 작아지기는 하나 거의 비슷한 값을 보인다. 이는 최적 임계값은 단말기 수에는 매우 민감하지만 채널 수에는 그렇지 않음을 의미한다.

다음은 채널 전환 지연 시간이 다이버시티 이득에 미치는 영향에 대해서 알아보자. 그림 2에서 보았듯이 지

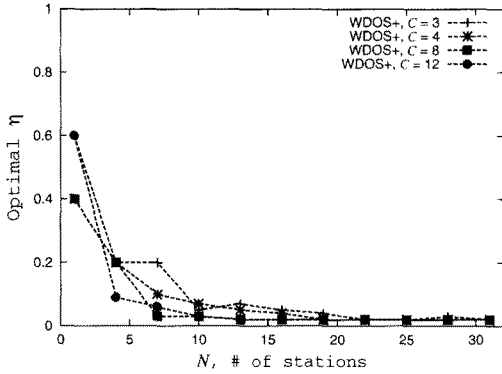


그림 3 단말기의 수  $N$ 과 변경 가능한 채널의 수  $C$ 에 대한 최적 임계값의 변화

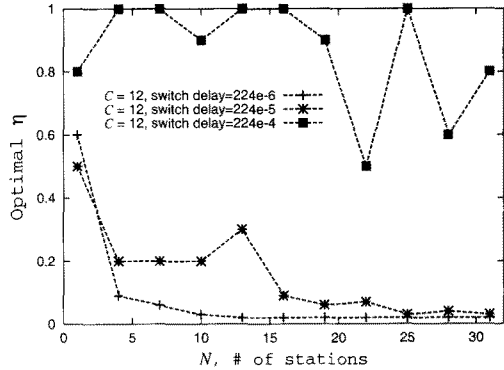


그림 5 단말기의 수  $N$ 과 채널 전환 지연에 대한 최적 임계값 변화

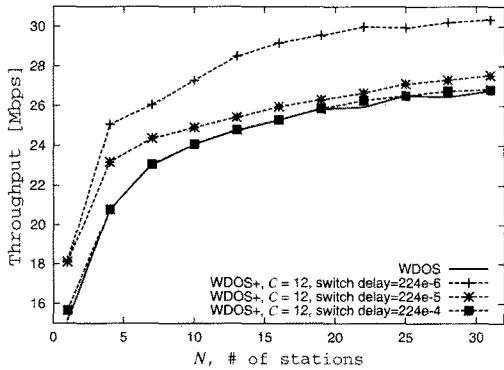


그림 4 단말기의 수  $N$ 과 채널 전환 지연에 대한 처리율 변화

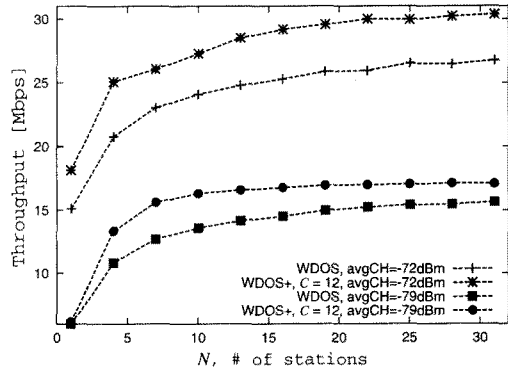


그림 6 단말기의 수  $N$ 과 평균 채널 상태에 대한 처리율 변화

연 시간이 224 us인 경우는 채널 수가 8개 이상이면 WDOS에 비해 평균 14% 이상의 채널 다이버시티 이득을 얻었다. 하지만 그림 4에서 보는 것과 같이 지연 시간이 2.24 ms나 22.4 ms로 커지면 이득이 크게 줄거나 아니면 아예 없어지게 된다. 이는 채널 전환을 통해 얻은 채널 다이버시티 이득을 채널 전환 비용으로 모두 지불하기 때문이다. 따라서 WDOS+가 WDOS에 비해 이득을 얻기 위해서는 채널 전환 지연 시간이 작아야 함을 알 수 있다.

채널 전환 지연 시간은 최적 임계값에도 많은 영향을 미친다. 그림 5에서 지연 시간이 커질수록 임계값이 상대적으로 커지다가 지연 시간이 22.4 ms가 되면 모든  $N$ 에 대해서 최적  $\eta$ 이 거의 1에 가까워진다. 이는 그림 4에서 보는 것과 같이 지연 시간이 22.4 ms인 경우는 이득이 거의 없기 때문에 채널 호핑을 할 필요가 없기 때문이다.

마지막으로 단말기들의 평균 채널 상태가 다이버시티 이득에 미치는 영향을 살펴본다. 그림 6에서 보면 평균

채널이 -72 dBm인 경우보다 -79 dBm인 경우에 더 낮은 이득이 관찰되었다. 평균 채널이 너무 낮게 되면 상대적으로 좋은 채널 상태를 보이는 확률 또한 낮아지게 되기 때문이다. 다르게 해석하면 [8]에서 언급한대로 페이딩의 변화 폭이 상대적으로 줄어들어서 그렇다. 하지만 그림 7과 같이 평균 채널 상태가 달라지더라도 최적 임계값은 거의 변화가 없다.

### 6. 결론

본 논문은 기존 다중사용자 다이버시티 기법 위에 채널 다이버시티 기법을 추가하여 다중사용자 다이버시티 이득의 한계를 채널 다이버시티를 통해 극복하였다는데 의미가 있다. 평균 채널 상태가 -72 dBm인 경우 WDOS+는 WDOS에 비해 14% 이상 처리율이 향상되었으며 MAD나 OSMA에 비교하면 최대 52.14%나 증가한 것이다. 최적 임계값은 단말기의 수와 채널 전환 지연 시간에 매우 민감한 반면에 채널 수나 단말기의 평균 채널 상태에는 무딘 반응을 보였다. 채널 전환 지연

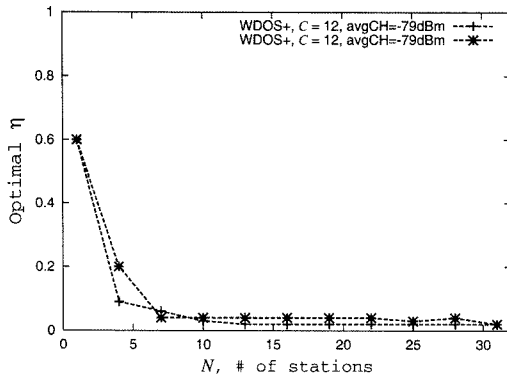


그림 7 단말기의 수  $N$ 과 평균 채널 상태에 대한 최적 임계값 변화

시간의 경우 224 us 보다 클 경우 이득이 많이 줄기 때문에 반드시 작은 채널 전환 지연 시간을 필요로 한다. Intel 칩셋의 경우 200 us 정도이기 때문에 WDOS+ 실현 가능성은 충분하다. 인텔 칩셋을 사용할 경우  $N=1$ 인 경우를 제외하고는 채널 전환 임계값을  $1/N$ 으로 잡으면 최적 성능에 유사한 성능을 얻을 수 있다.

### 참 조 문 헌

- [1] T. S. Rappaport, "Wireless communications: principles and practice," 2nd Edition, Prentice Hall.
- [2] Qualcomm, Inc., "1xEV: 1x evolution IS-856 TIA/EIA standard airlink overview," Nov. 7, 2001, Revision 7.2.
- [3] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition.
- [4] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushyana, and A. Viterbi, "CDMA/HDR: a bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users," IEEE Commun. Mag., Vol.38, No.7, pp. 70-77, Jul. 2000.
- [5] Z. Ji, Y. Yang, J. Zhou, M. Takai, and R. Bagorodia, "Exploiting medium access diversity in rate adaptive wireless LANs," Proc. ACM MOBICOM 2004, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 345-359, Sep. 2004.
- [6] J. Wang, H. Zhai, and Y. Fang, "Opportunistic packet scheduling and media access control for wireless LANs and multi-hop ad hoc networks," Proc. IEEE WCNC 2004, Atlanta, Georgia, Mar. 2004.
- [7] Seong-il Hahm, Jong-won Lee, and Chong-kwon Kim, "Maximizing Multiuser Diversity Gains in IEEE 802.11 WLANs," ELSEVIER Computer Networks, Vol.52, No.5, pp. 1040-1057, Apr. 2008.
- [8] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.48, No.6, pp. 1277-1294, Jun. 2002.
- [9] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band," IEEE Std 802.11a-1999(R2003). (Supplement to IEEE Std 802.11-1999).
- [10] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 2: Higher-speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz Band," IEEE Std 802.11b-1999 (R2003) (Supplement to ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition).
- [11] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band," IEEE Std 802.11gTM-2003 (Amendment to IEEE Std 802.11TM, 1999 Edition (Reaff 2003)).
- [12] A. Sabharwal, A. Khoshnevis, and E. Knightly, "Opportunistic Spectral Usage: Bounds and a Multi-band CSMA/CA Protocol," IEEE/ACM TON, Vol.15, No.3, pp. 533-545, Jun. 2007.
- [13] N. B. Chang and M. Liu, "Optimal Channel Probing and Transmission Scheduling for Opportunistic Spectrum Access," in Proc. ACM MOBICOM, Montreal, Canada, Sep. 2007.
- [14] D. Zheng and J. Zhang, "Joint Optimal Channel Probing and Transmission in Collocated Wireless Networks," in Proc. IEEE INFOCOM, Anchorage, USA, May 2007.
- [15] A. Mishra, V. Shrivastava, D. Agarwal, S. Banerjee, and S. Ganguly, "Distributed Channel Management in Uncoordinated Wireless Environments," in Proc. ACM MOBICOM, Los Angeles, USA, Sep. 2006.
- [16] R. Gummadi, D. Wetherall, B. Greenstein, and S. Seshan, "Understanding and Mitigating the Impact of RF Interference on 802.11 Networks," in Proc. ACM SIGCOMM, Kyoto, Japan, Aug. 2007.
- [17] V. Navda, A. Bohra, S. Ganguly, and D. Rubenstein, "Using Channel Hopping to Increase 802.11 Resilience to Jamming Attacks," in Proc. IEEE INFOCOM, Anchorage, USA, May 2007.
- [18] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee, IEEE Std 802.11h-2003. (Amendment to IEEE Std 802.11, 1999 Edition), 2003.



함 성 일

2002년 한동대학교 전산·전자공학부(학사). 2004년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부(석사). 2004년~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사과정. 관심분야는 무선랜, 애드혹망, 무선메쉬망에서 자원 할당 및 기회적 스케줄링



김 종 권

1981년 서울대학교 산업공학과(학사). 1982년 미국 조지아 공과대학교 산업공학과(석사). 1987년 미국 일리노이 대학교 전산학과(박사). 1984년~1987년 IBM 산호세 연구소 연구조원. 1987년 1월~1991년 미국 Belcore 통신연구소 연구원. 1991년~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 차세대인터넷, 초고속라우터, 이동통신