IEEE 802.11 WLAN에서 송신단 기반 전송률 적응기법
(A Sender-oriented Automatic Rate Adaptation Scheme in IEEE 802.11 WLANs)

이 선 헌 † 정 광 수 ††
(Sunhun Lee) (Kwangsue Chung)

요 약 무선랜 환경에서 전송률 적응기법은 무선 채널의 현재 상태에 따라 최적의 전송모드를 선택함으로써 제한된 무선랜 대역폭 사용에 대한 효율성을 향상시키는 목적을 가진다. 하지만 무선랜 표준에서는 이러한 전송률 적응기법에 관한 알고리즘이나 프로토콜을 정의하지 않고 있으며, 이로 인해 전송률 적응기법에 관한 많은 연구가 이루어졌다. 본 논문에서는 기존에 제안된 전송률 적응기법들의 문제점들을 개선하는 기법으로서 송신노드 기반의 전송률 적응기법을 제안한다. 제안하는 기법은 송신노드에서 수신하는 패킷으로부터 측정되는 신호감도를 기반으로 무선 채널의 상태를 측정하고, 이를 기반으로 최적의 성능을 기대할 수 있는 전송모드를 프레임 단위로 조절하게 된다. 또한 전송모드 선택의 기준이 되는 신호감도 범위를 지속적으로 갱신하고 RTS/CTS 교환을 선택적으로 사용할 수 있게 함으로써 무선 채널의 상태 변화에 대해 적응적이고 안정적으로 전송모드를 결정하게 된다. 시뮬레이션을 이용한 성능평가를 통해 제안하는 전송률 적응기법이 기존의 전송률 적응기법들의 장점들을 유지하면서, 각각의 기법들이 가지는 문제점을 개선할 수 있음을 검증하였다.
키워드 : 전송률 적응기법, IEEE 802.11

Abstract IEEE 802.11 WLANs provide multiple transmission rates to improve the system throughput by adapting the transmission rate to the current wireless channel conditions. Many rate adaptation schemes have been proposed because IEEE 802.11 standard does not contain any specifications for the rate adaptation scheme. In this paper, in order to overcome limitations of the previous research, we propose a new rate adaptation scheme called SARA(Sender-oriented Automatic Rate Adaptation). The SARA scheme, a proposed rate adaptation scheme, appropriately adjusts the data transmission rate based on the estimated wireless channel conditions, specifically the measured RSSI at the sender-side. Moreover it continuously updates the thresholds for selecting the transmission rate and selectively enforces the RTS/CTS exchanges to adapt the changes in the wireless channel conditions. Through the performance evaluations, we prove that the SARA scheme overcomes the limitations of the previous research and improves the wireless link utilization.
Key words : Rate Adaptation, IEEE 802.11

1. 서 론

현재 가정이나 사무실, 공공장소에서의 무선랜(WLAN, Wireless Local Area Network)에 대한 사용이 활발하게 이루어지고 있으며, 이러한 무선랜의 사용 증가는 더욱 확대될 것으로 기대되고 있다. 무선랜 표준은 IEEE 802.11 워킹그룹에서 표준화가 되었으며 Wi-Fi 연합에 의해 보편화 되었다. 무선랜 표준에서는 네트워크 각 계층에서 MAC(Medium Access Control) 계층과 PHY(Physical) 계층의 규격을 정의하고 있다. MAC 계층에서는 개방된 형태의 무선 채널에 대한 경쟁 방식의 접근을 제어하기 위

· 본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

† 학생회원 : 광운대학교 전자통신공학과
sunlee@adams.kw.ac.kr
†† 정 회 원 : 광운대학교 전자통신공학과 교수
kchung@kw.ac.kr
논문접수 : 2007년 9월 28일
심사완료 : 2008년 11월 9일

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 제2호(2009.4)

해 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 기반의 DCF(Distributed Coordination Function) 사용을 의무화하고 있으며, 부가적으로 비경쟁 방식의 PCF(Point Coordination Function)를 명시하고 있으나, 실제 무선랜 디바이스에서는 대부분 DCF 기능만을 구현하고 있다. 무선랜의 PHY 계층에서는 서로 다른 변조(Modulation) 및 채널 코딩 기법을 사용하여 복수의 전송모드를 지원하고 있다[1,2].

무선 채널의 상태는 채널 에러나, 간섭(Interference), 페이딩(Fading), 그리고 디바이스의 이동(Mobility) 등으로 인해 계속 변화하는 특성을 갖는다. 일반적으로 고속의 전송모드가 저속의 전송모드에 비해 더 많은 데이터를 전달하지만, 무선 채널의 상태가 나쁠 경우에는 고속의 전송모드에서 발생하는 데이터 손실의 증가로 인해, 오히려 저속의 전송모드가 더 높은 성능을 보이게 된다. 다양한 채널 상태에서 서로 다른 변조기법에 따른 비트에러율(BER, Bit Error Rate)의 관계를 통해 특정 무선 채널 환경에서 최적의 성능을 가지는 전송모드가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 현재의 IEEE 802.11 표준에서는 PHY 계층이 가지는 복수의 전송모드를 효율적으로 사용하기 위한 알고리즘이나 프로토콜에 관한 내용이 명시되어 있지 않다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 무선 채널의 상태가 변화하는 상황에서 최적의 성능을 얻을 수 있도록 변조기법의 변화를 통해 전송모드를 조절하는 전송률 적응기법(Rate Adaptation)에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[3~9]. 무선랜에서 전송률 적응기법의 목적은 특정 무선 채널 환경에서 일정 레벨의 비트에러율을 만족하는 전송모드에서 최적의 성능을 가질 것으로 기대되는 전송모드를 적절히 조절함으로써 무선랜의 대역폭 활용도(Link utilization)를 최대화하는 것에 있다.

본 논문에서는 무선랜 환경을 위한 새로운 전송률 적응기법인 SARA(Sender-oriented Automatic Rate Adaptation) 기법을 제안한다. 제안하는 SARA 기법은 송신단에서 측정된 신호감도를 근거로 무선 채널의 상태를 판단하며, 이를 기반으로 PHY 계층에서 지원하는 다양한 변조기법 중에서 최적의 성능을 보일 것으로 예측되는 전송모드를 자동으로 선택하게 된다. 실험을 통해 제안하는 전송률 적응기법이 무선 채널의 상태 변화에 빠르게 반응하며 적절한 전송모드의 선택을 통해 무선 네트워크의 대역폭을 보다 효율적으로 사용할 수 있음을 검증하였다.

본 논문의 2장에서는 전송률 적응기법과 관련하여 기존에 수행된 연구에 대해서 설명하며, 3장에서는 논문에서 제안하는 SARA 기법에 대하여 상세히 기술하도록 한다. SARA 기법에 대한 성능 검증은 4장에서 기술하였으며 5장에서 논문의 결론 및 향후 연구 방향에 대해서 기술한다.

2. 관련 연구

2.1 IEEE 802.11 표준

IEEE 802.11 표준은 무선 네트워크 접속을 위한 MAC과 PHY 계층에 대한 규격을 정의하고 있다. MAC 계층에서는 경쟁기반의 접근 방법인 DCF와 비경쟁 기반의 PCF를 정의하고 있지만 대부분의 무선랜 디바이스들은 DCF만을 지원하고 있다. DCF 모드에서 여러 노드들이 동시에 프레임을 전송할 경우, 충돌(Collision)이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 MAC에서는 바이너리 슬롯 기반의 exponential back-off 알고리즘과 재전송 기법을 정의하고 있다. 또한 무선 채널의 에러에 의해 발생하는 패킷 손실에 대한 재전송을 위해 MAC 계층의 프레임에 대한 ACK(Acknowledgment) 패킷을 전송하며 패킷 충돌의 가능성을 줄이기 위해 4-way handshake를 통한 채널 예약 메커니즘을 정의하고 있다. 충돌없이 데이터를 전송하기 위해 무선 노드는 프레임을 전송하기 전에, 무선 채널의 상태를 감지한다. 무선 채널이 DIFS(DCF Inter-Frame Space)동안 Idle 상태로 존재하면 데이터 프레임 전송을 위해 RTS(Request To Send) 프레임을 전송한다. RTS 프레임을 수신한 수신노드는 RTS에 대한 응답으로 SIFS(Short Inter-Frame Space) 후에 CTS(Clear To Send) 프레임을 송신노드에 전송하게 된다. 전송범위 안의 모든 다른 노드들은 감지한 RTS와 CTS로부터 자신의 NAV(Network Allocation Vector)를 설정함으로써 데이터 프레임의 전송이 성공적으로 수행되도록 자신의 데이터 전송을 미루게 된다. CTS를 수신한 송신노드는 SIFS만큼 대기한 후에 데이터 프레임을 충돌없이 성공적으로 전송할 수 있게 된다. 데이터 프레임을 성공적으로 수신한 수신노드는 응답으로서 ACK 프레임을 SIFS 이후에 전송하게 된다[1,2]. 그림 1에서는 이러한 무선랜 MAC 계층에서의 매체접근 방식을 보여준다.

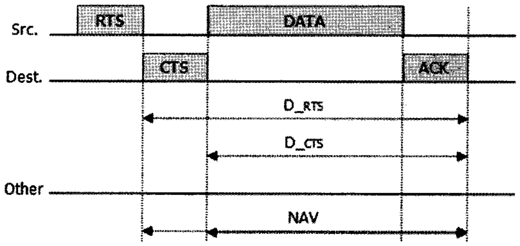


그림 1 IEEE 802.11에서의 매체접근

2.2 기존의 전송률 적응기법

IEEE 802.11 PHY 계층에서는 서로 다른 변조 및 채널 코딩 방식에 의해 여러 전송모드를 지원한다. 오리지

널 IEEE 802.11 표준에서는 2.4GHz ISM(Instrumental, Scientific and Medical) 밴드에서 1과 2 Mbps를 지원하며 802.11b에서는 추가로 5.5, 11 Mbps까지 지원하며 최근의 802.11 a/g에서는 54Mbps의 고속의 전송모드까지 지원한다. 무선 채널의 상태가 좋을 경우, 높은 전송률의 전송모드는 높은 처리율을 보이지만, 무선 채널의 상태가 안좋을 경우, 비트에러율의 증가에 의해 오히려 낮은 처리율을 보인다. 즉, 다양한 무선 채널의 상태에서 다른 전송모드에 비해 우월한 성능을 제공하는 전송모드가 존재하게 된다[4]. 무선랜은 페이딩이나 간섭, 노드의 이동성 등에 의해 채널 상태가 계속적으로 변화하므로 이러한 무선 채널 상태 변화에 대해 자동적으로 전송모드를 선택할 수 있는 기법이 필요하다. 하지만 현재의 무선랜 표준에서는 전송률 적응기법에 대한 어떠한 프로토콜이나 메커니즘을 정의하고 있지 않다. 시간과 위치에 따라 지속적으로 변화하는 무선 채널의 상태 변화에 대하여 최적의 성능을 보일 수 있는 전송모드를 선택함으로써 무선랜의 시스템 효율성을 높이기 위한 목적으로 전송률 적응기법에 대한 연구가 진행되었다.

전송률 적응기법은 기능상으로 무선 채널의 상태를 예측하는 부분과 채널 상태를 기반으로 적합한 전송모드를 선택하는 부분으로 구성된다. 채널 상태 예측 부분에서는 평균 처리율(Throughput)이나 패킷 손실 정보(BER, PER), 또는 SNR(Signal to Noise Ratio)이나 수신되는 신호의 감도(RSSI, Received Signal Strength Indicator)를 통해 채널 상태를 예측하게 되며, 일반적으로 무선 채널의 특성상 수신노드에서 좀 더 정확한 정보를 얻을 수 있다. 전송모드를 결정하는 부분에서는 무선 채널 상태 정보를 기반으로 최적의 성능을 나타낼 것이라 기대되는 전송모드를 결정하며, 일반적으로 미리 정의된 범위(Threshold)를 이용하여 적절한 전송모드를 선택하게 된다[10].

무선랜에서의 전송률 적응기법에 관한 연구들은 크게 두 가지 접근방법으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 통계적 수치기반의 방법(Statistics-based approach)으로 평균 처리율이나, 데이터 손실율, 그리고 재전송률과 같은 통계적인 수치를 기반으로 채널 상태를 예측하게 된다. 통계적인 수치를 이용하여 채널 상태를 단순히 좋거나 나쁘다는 것으로 판단하게 되며 따라서 전송모드 조절이 인접한 모드로 단계적으로 이루어지게 된다. 두 번째는 채널 품질기반의 방법(Channel quality-based approach)으로 PHY에서 제공하는 신호감도나 SNR 정보를 기반으로 무선 채널의 상태를 정량적으로 측정하고 이를 이용하여 적절한 전송모드를 선택하는 방법이다. 다른 분류방법으로 채널 상태 정보를 얻는 방법에 따라 open-loop 방식과 closed-loop 방식으로 구분할 수도 있다[5,8].

통계적 수치기반의 방법으로 대표적으로 ARF(Automatic Rate Fallback) 기법이 있다[3]. ARF는 Lucent의 WaveLAN-II 제품군에 구현되어 현재 가장 널리 사용되고 있는 기법으로 프레임의 전송 성공 여부와 타이머를 이용하여 전송모드를 순차적으로 조절하게 된다. 현재의 전송모드에서 2개의 연속적인 프레임전송이 실패할 경우, 한 단계 낮은 전송모드로 전송률을 감소시키게 되며, 10개의 연속적인 프레임전송이 성공할 경우, 한 단계 높은 전송모드로 전송률을 증가시키게 된다. 또한 전송률 감소 이후에, 일정 시간이 경과하면 자동으로 전송모드를 한 단계 높임으로써 높은 모드에서의 전송을 시도하게 된다. ARF의 발전된 형태로 ARF가 가지는 전송모드 조절주기를 적응적으로 조절하는 기법으로 Adaptive ARF가 제안되기도 하였다. 하지만 여러 노드가 존재하는 무선랜의 BSS(Basic Service Set) 환경에서는 무선 채널을 경쟁하는 과정에서 충돌이 발생할 수 있으며 이와 같은 상황에서 ARF 기법은 성능 저하가 발생할 수 있다. 즉, ARF는 충돌에 의한 패킷 손실을 채널 에러에 의한 것으로 오해하여 불필요하게 전송모드를 낮춤으로써 무선랜 시스템의 성능을 저하시키게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 CARA(Collision-Aware Rate Adaptation)로 대표되는 충돌을 인지하는 통계적 수치기반 전송률 적응기법들이 제안되었다[5,6]. 이러한 전송률 적응기법들은 채널 에러로부터 충돌에 의한 에러를 구분하기 위해 CCA(Clear Channel Assessment) 기법과 함께 선택적인 RTS/CTS 교환을 사용한다. 채널 에러와 충돌에 의한 에러를 구분함으로써 무선 채널의 상태를 좀 더 정확하게 측정하며, 불필요한 전송모드 저하를 예방함으로써 무선 채널의 대역폭을 효율적으로 사용할 수 있다.

ARF로 대표되는 통계적 수치기반 방법은 근본적인 한계를 갖는다. 채널 상태를 단순히 "좋다" 혹은 "나쁘다"로 예측하므로 정량적인 상태 정보를 제공할 수 없으며 이러한 특성으로 인해 전송모드의 조절이 인접한 단계로 한 단계씩, 순차적으로 이루어지게 된다. 따라서 채널 상태 변화가 클 경우, 적절한 전송모드로 조절하는 시간이 오래 걸린다는 근본적인 한계를 가지며 이로 인해 무선 채널 사용의 효율성을 저하시킨다는 문제점을 갖는다. 하지만 무선랜 디바이스의 구현 측면에 있어서, 비교적 쉽게 구현할 수 있다는 장점으로 인해 현재의 대부분의 무선랜 디바이스에서 ARF와 같은 통계적 수치기반의 전송률 적응기법을 사용하고 있다.

채널 품질기반의 방법으로 대표적으로 RBAR(Receiver-Based Auto-Rate) 기법이 있다[4]. RBAR는 프레임을 전송하는 시점에서 현재 무선 채널의 상태를 SNR로 측정하고 측정된 SNR에서 가장 높은 성능을 가질 것으로

기대되는 전송모드를 결정해서 전송하게 된다. RBAR에서는 실질적인 데이터 프레임을 전송하기 전에 채널 상태를 측정하기 위해 무선랜 표준에서 정의하고 있는 RTS/CTS 교환을 이용한다. 수신노드에서는 RTS 프레임을 수신할 때, 현재 무선 채널의 상태를 SNR 형태로 측정하게 되며 측정된 SNR 정보를 기반으로 최적의 전송모드를 결정하게 된다. 전송모드의 결정은 미리 정의된 SNR과 전송모드와의 맵핑정보를 기반으로 이루어진다. 이렇게 결정된 전송모드는 CTS를 통해 송신노드에 제공되며 송신노드에서는 해당 전송모드로 프레임을 전송함으로써 프레임 단위의 전송모드 적용이 가능하게 된다. 전송범위안의 다른 노드들의 NAV 설정을 통한 충돌 예방을 위해 RBAR에서의 무선 매체접근은 그림 2와 같이 달라진다. RBAR에서의 데이터 프레임에 대한 전송모드는 RTS/CTS 교환이 이루어진 이후에 결정되므로 충돌 회피를 위한 채널 예약 시간도 바뀌게 된다. 수정된 현재 데이터 프레임의 전송모드에 기반한 채널 예약 시간은 MAC 헤더를 확장한 RSH(Reservation Sub-Header)에 실려서 전송되며 전송범위 안의 다른 노드들은 이를 감지하여 자신의 NAV를 갱신하여 데이터 전송을 연기함으로써 표준과 마찬가지로 충돌이 발생하는 것을 예방하게 된다.

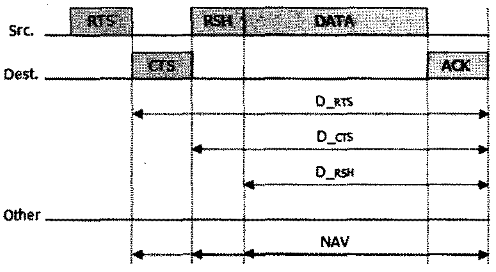


그림 2 RBAR의 채널 사용

RBAR로 대표되는 신호 품질기반의 전송률 적응기법은 무선 채널의 상태를 정량적으로 측정하고 적합한 전송모드를 빠르게 결정할 수 있으므로 무선 채널 상태 변화에 빠르게 반응한다는 확실한 장점을 갖는다. 하지만 채널 상태 판단의 기준이 되는 SNR 값의 신뢰성에 대한 불확실성으로 인해 대부분의 무선랜 디바이스에서는 앞서 기술한 통계적 수치기반의 전송률 적응기법을 사용한다. 또한 그림 2의 매체접근 과정에서 기존의 IEEE 802.11 표준 프레임 포맷과의 불일치로 인한 호환성 측면에서의 문제점을 갖는다.

3. 새로운 전송률 적응기법

3.1 문제 제기

전송률 적응기법에서 가장 중요한 요구사항은 불안정한 무선 채널의 상태를 반영하여 빠르게 전송모드를 조절함으로써 무선 채널의 대역폭 사용에 대한 효율성을 높이는데 있다. 이러한 기준에서 채널 품질기반의 적응기법들은 채널 상태 변화에 대한 빠른 반응성을 가진다는 명백한 장점이 있다. 하지만 2장에서 기술하였듯이, 채널 상태에 대한 정보인 SNR 정보의 신뢰성에 대한 불확실함과 실제로 SNR 정보를 제공하는 디바이스가 많지 않다는 한계, 그리고 수신단에서 측정한 SNR 정보를 송신단까지 전달해 주는 과정에서 발생하는 오버헤드나 프레임 포맷의 변화로 인해 발생하는 표준과의 비호환성 등의 문제점을 갖는다. 또한 대부분의 무선랜 환경에서는 AP(Access Point)를 기반으로 서비스를 제공하는 BSS 모드로 동작하며, 충돌 발생을 줄이기 위한 RTS/CTS 교환을 일정 크기 이상(기본적으로 RTS threshold인 2,347 bytes)의 프레임을 전송할 경우에만 선택적으로 사용한다. RBAR의 경우, 프레임 단위별 전송모드 선택을 위해, 가장 낮은 전송모드(802.11b에서는 1Mbps)로 전송되는 RTS/CTS 프레임을 매 데이터 프레임마다 교환하게 되며 이러한 오버헤드로 인해 무선 채널의 대역폭 사용에 대한 효율성을 저하시키게 된다.

기존의 채널 품질기반의 전송률 적응기법의 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 제안하는 기법은 다음의 특성을 가지게 된다. 먼저, SNR 정보의 한계를 개선하기 위하여 일반적인 무선랜 디바이스의 PHY 계층에서 제공하는 수신하는 프레임에 대한 신호감도인 RSSI 값을 사용한다. 그리고 수신노드에서 측정한 채널 정보를 송신노드에 전달하는 과정에서 발생하는 문제점을 개선하기 위해, 수신노드로부터 송신노드에 전송되는 이전 데이터 프레임에 대한 ACK 프레임으로부터 측정한 RSSI 값을 기반으로 현재 무선 채널의 상태를 예측하고, 적절한 전송모드를 결정하게 된다. 또한, 각각의 데이터 프레임을 전송하기 전에 교환하는 RTS/CTS 프레임으로 발생하는 대역폭의 소비를 해결하기 위해서 제안하는 기법에서는 첫 번째 데이터 프레임 전송에서 손실이 발생한 경우에만 RTS/CTS 교환을 사용하게 된다. 이러한 특징을 가지는 새로운 전송률 적응기법에 대한 상세한 설명을 3.2절에서 자세히 기술할 것이다.

3.2 SARA 기법

본 논문에서는 IEEE 802.11의 BSS모드에 적용 가능한 새로운 전송률 적응기법으로서, 송신노드에서 측정한 RSSI 정보를 기반으로 현재 무선 채널의 상태에 적합한 전송모드를 자동으로 조절하는 SARA 기법을 제안한다. 일반적으로 패킷 수신시 측정되는 RSSI 정보는 거리의 제곱에 반비례하여 감소하는 특성을 가진다. 제안하는 전송률 적응기법에서는 AP기반의 무선랜 환경에서 무선

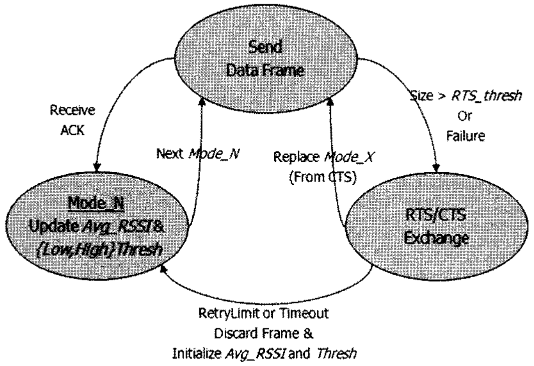


그림 3 SARA의 동작 과정

채널의 상태를 예측하는 기준이 되는 RSSI 정보가 방향성에 상관없이 송신노드에서 측정한 RSSI와 수신노드에서 측정한 RSSI가 근사한 값을 갖는 것으로 가정하였으며, 이후의 실험을 통해 이를 검증하였다[11,12].

제안하는 SARA 기법의 동작 과정을 그림 3에 나타내었다. 상위 계층으로부터 MAC 계층으로 전송 요청된 데이터 프레임은 현재 선택된 전송모드를 통해 전달된다. 현재의 전송모드는 이전 데이터 프레임에 대한 ACK 프레임 수신시에 측정된 RSSI 정보를 기반으로 선택된 전송모드이다. 전송모드의 선택은 채널품질 기반의 전송률 적응기법에서와 마찬가지로 미리 정의되어 있는 RSSI 정보와 변조 및 채널코딩 정도와의 관계로부터 결정된다. 즉, 측정된 RSSI 값이 포함되는 범위(Threshold)를 가지는 전송모드로 결정된다. 선택된 전송모드를 이용한 데이터 프레임 전송이 성공할 경우, 마찬가지로 ACK 프레임을 수신할 때 측정된 RSSI (*Current_RSSI*)를 기준으로 다음 데이터 프레임의 전송모드(*Mode_N*)를 선택한다. 성공적인 데이터 프레임 전송 이후에는 다음 데이터 프레임의 전송모드를 갱신할 뿐만 아니라, 전송모드의 동작가능 범위를 갱신하기 위해서 해당 전송모드(*Mode_N*)의 평균 RSSI($Avg_RSSI_{Mode_N}$) 및 RSSI Thresholds($LowThresh_{Mode_N}$, $HighThresh_{Mode_N}$)를 다시 계산하게 된다. ACK 프레임으로부터 측정된 RSSI 정보를 기반으로 현재 전송모드의 평균 RSSI를 갱신하는 방법은 식 (1)과 같이, 이전의 평균 RSSI와 현재 측정된 RSSI로부터 저역 통과 필터링에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}&\text{if}\ (LowThresh_{Mode_N} \le Current_RSSI\ \text{and}\\&\quad Current_RSSI \le HighThresh_{Mode_N})\\&\quad Select\ Mode_N;\\&\quad Avg_RSSI_{Mode_N} = 0.8\times Avg_RSSI_{Mode_N}\\&\qquad\qquad + 0.2\times Current_RSSI\end{aligned} \tag{1}$$

해당 전송모드의 평균 RSSI를 갱신한 후, 이를 기반으로 해당 전송모드의 동작가능범위를 갱신해야 한다. 식 (2)에서와 같이 상위기준($HighThresh_{Mode_N}$)의 경우, 갱신된 해당 전송모드의 평균 RSSI와 한 단계 높은 전송모드, *Mode_(N+1)*의 평균 RSSI와의 중간값으로 계산된다. 하위기준($LowThresh_{Mode_N}$)의 경우, 해당 전송모드의 평균 RSSI와 한 단계 낮은 전송모드, *Mode_(N-1)*의 평균 RSSI의 중간값으로 계산된다. 각각의 전송모드가 중첩되는 것을 예방하기 위해 해당 전송모드에 대한 동작가능범위의 갱신을 기반으로 한 단계 높은 전송모드의 하위기준과 한 단계 낮은 전송모드의 상위기준 또한 갱신한다.

$$\begin{aligned}&HighThresh_{Mode_N} = \frac{Avg_RSSI_{Mode_N} + Avg_RSSI_{Mode_(N+1)}}{2}\\&(LowThresh_{Mode_(N+1)} = HighThresh_{Mode_N})\\&LowThresh_{Mode_N} = \frac{Avg_RSSI_{Mode_(N-1)} + Avg_RSSI_{Mode_N}}{2}\\&(HighThresh_{Mode_(N-1)} = LowThresh_{Mode_N})\end{aligned} \tag{2}$$

그림 4에서는 측정된 RSSI를 기반으로 다음 프레임을 전송할 전송모드를 선택하고, 해당 전송모드와 인접한 전송모드의 동작가능범위를 갱신하는 과정을 표현하였다. *i*번째 데이터 프레임 전송에 대한 ACK 프레임 수신시 측정된 RSSI 정보를 기준으로 *j*번째 데이터 프레임 전송을 위한 전송모드가 *Mode_N*으로 선택된다. 이 과정에서 식 (1)과 식 (2)의 공식에 의하여 *Mode_N*의 평균 RSSI를 갱신하고 이를 기반으로 해당 전송모드의 동작가능범위가 갱신된다. 마찬가지로 *j*번째 데이터 프레임에 대한 ACK를 수신할 경우, 다음 프레임의 전송모드 *Mode_(N+1)*을 결정하고 해당 전송모드에 대한 동작가능범위를 갱신하게 된다.

제안하는 SARA 기법에서는 무선 채널 상태의 변화

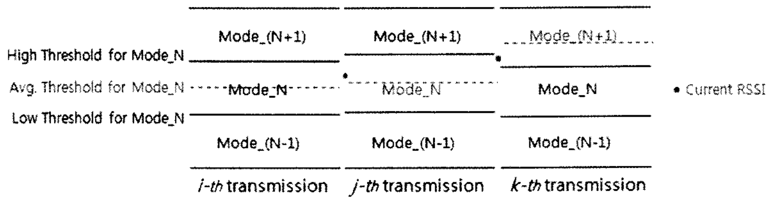


그림 4 전송모드의 결정 및 Threshold 갱신

에 대해 적합한 전송모드를 선택하기 위해 전송모드를 결정하는 기준이 되는 동작가능범위를 지속적으로 갱신하게 된다. 이러한 동작가능범위의 갱신은 선택된 전송모드로 데이터 프레임의 전송이 성공적으로 이루어질 경우에 한해서 수행된다. 데이터 프레임 전송이 성공할 경우, 해당 전송모드가 동작 가능한 범위를 측정된 RSSI 정보를 기반으로 갱신함으로써 해당 전송모드의 동작가능범위($LowThresh_{Mode_N} \sim HighThresh_{Mode_N}$)가 무선 채널 환경의 상태 변화에 대해 적응적으로 변화하게 된다. 기존의 연구에서도 이러한 동작가능범위에 대한 갱신 기법이 적용되었으나, 안정하거나 불안정한 채널 상태에 대해 각각의 동작가능범위를 정의하고 채널 상태에 따라 이를 스위칭하는 방법이었거나, 채널 상태가 안좋을 경우, 동작가능범위를 높여주어 낮은 전송모드를 선택할 확률을 높여주는 기법이었다[8,9]. 이와 달리 제안하는 SARA 기법은 데이터 프레임의 전송이 성공한 경우에만 해당 전송모드의 동작가능범위를 갱신함으로써 무선 채널의 상태 변화에 대해 전송모드의 동작가능범위를 지속적으로 갱신한다. 이와 같은 특성으로 인해 순간적인 무선 채널의 상태 변화에 강건하게 동작할 수 있으며 가능한 높은 전송모드로 데이터 프레임 전송을 시도하게 된다.

데이터 프레임의 크기가 RTS Threshold(기본 2,347 bytes)보다 크거나 데이터 프레임의 첫 번째 전송이 실패할 경우, SARA 기법은 RTS/CTS 교환을 인위적으로 수행한다. SARA기법에서 현재의 전송모드는 이전 데이터 프레임에 대한 ACK 프레임 수신시 측정된 RSSI 정보로부터 결정된다. 현재 데이터 프레임의 전송 실패는 이전 데이터 프레임의 ACK 수신 이후로 무선 채널 상태가 급격히 변화하여 현재의 전송모드가 부적합하거나, 다른 노드들과의 무선 채널 경쟁에서 발생할 수 있는 충돌에 의한 손실로 판단할 수 있다. 두 가지 문제점을 동시에 해결하기 위해 SARA 기법에서는 기존에 제안된 기법들과 같이 RTS/CTS 교환을 인위적으로 수행함으로써 프레임 재전송시 발생할 수 있는 충돌 상황을 회피할 수 있으며, CTS 프레임 수신시 측정된 RSSI를 기반으로 현재의 변화된 무선 채널 상태에 적합한 전송모드로 전송모드를 바꾸어 데이터 프레임에 대한 재전송을 시도하게 된다.

프레임의 재전송 횟수가 허용횟수(Retry limit)를 초과하거나 타임아웃이 발생할 경우, 무선랜 표준에서와 같이 해당 데이터 프레임은 폐기된다. 이는 무선 채널 상태의 급격한 변화로 인하여 전송모드를 선택하는 기준인 각 전송모드의 전송가능범위에서 오차가 크게 발생하는 것으로 예측할 수 있다. 따라서 이와 같은 경우, 각 전송모드에 대한 전송가능범위인 RSSI Threshold 및 평균 RSSI는 미리 정의된 값으로 초기화된다.

4. 실험 및 성능 평가

본 장에서는 논문에서 제안하는 전송률 적응기법인 SARA의 성능 평가 실험 내용을 기술한다. 성능 평가를 위해 LBNL(Lawrence Berkely National Laboratory)의 ns-2(network simulator)를 사용하여 실험을 수행하였으며 기존 연구인 ARF와 RBAR와의 성능 비교를 수행하였다[13].

4.1 실험 환경

제안하는 SARA 기법의 성능을 평가하기 위해서 그림 5와 같은 시뮬레이션 환경을 구성하여 성능 실험을 수행하였다. AP를 포함해서 한 개 이상의 이동하는 노드로 이루어지는 BSS 모드로 구성하였으며 전송률 적응기법의 성능을 평가하기 위해 4Mbps의 CBR(Constant Bit Rate) 트래픽을 발생시키면서 SARA 기법과 기존 연구들과의 성능 비교를 수행하였다. 전체 시뮬레이션은 50초 동안 수행하였으며, 채널 상태를 변화시키기 위해 10초~30초 동안은 저속으로 AP로부터 멀어지도록 하였고, 30초~40초 동안은 중속으로 AP로 다시 근접하도록, 그리고 40초~50초 동안은 고속으로 멀어지도록 이동성을 주었다. 시뮬레이션 환경에서 무선 채널의 페이딩 모델 적용은, Ricean 페이딩 모델을 패킷 네트워크 시뮬레이션 환경에서 적용한 사례를 기반으로 ns-2에서 이를 구현한 시스템을 기반으로 하였으며, 파라미터 K를 0으로 설정하여 가상적인 Rayleigh 페이딩 모델을 적용하였다[14,15].

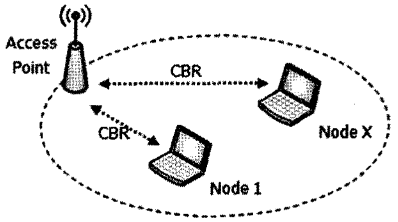


그림 5 시뮬레이션 환경

표 1은 SARA 기법을 위한 IEEE 802.11b에서 각 전송모드에 대한 변조기법과 RSSI 동작범위를 나타낸 것이다. RSSI 동작범위는 전송모드별 신호감도를 기준으로 적용하였으며, 신호감도에 대한 RSSI는 식 (3)과 같이 Atheros 칩을 사용하는 무선랜 디바이스에서 적용하는 맵핑 방식을 사용하여 산출하였다. 노드의 전송파워는 15dBm으로 가정하여 성능실험을 수행하였다[12].

$$RSSI = Received\,Signal\,Strength(dBm) + 95 \quad (3)$$

표 1 전송모드별 RSSI Thresholds 설정

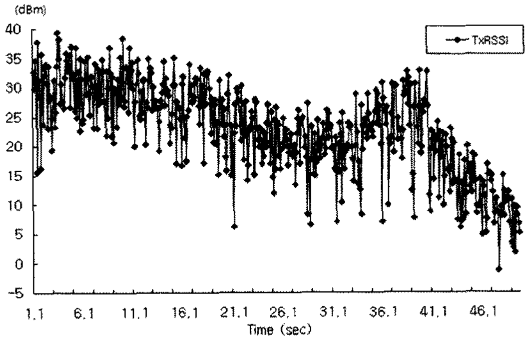
전송모드 (변조기법)	RSSI	
	LowThreshold	HighThreshold
11Mbps (CCK)	13	-
5.5Mbps (CCK)	8	13
2Mbps (DQPSK)	4	8
1Mbps (DBPSK)	1	4

4.2 성능 평가

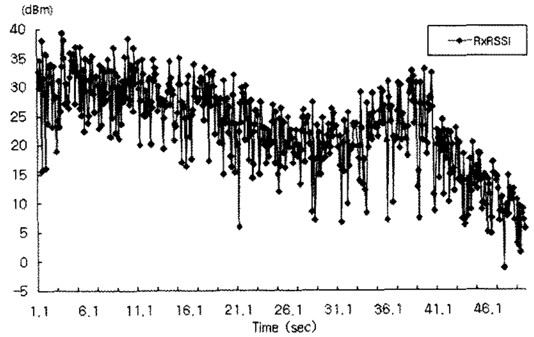
SARA 기법에서는 전송모드 결정을 위해 송신노드에서 측정한 RSSI 정보를 이용한다. 따라서 우선적으로 송신노드에서 측정한 RSSI 정보와 수신노드에서 측정한 RSSI 정보가 어느 정도 유사한지를 살펴볼 필요성이 있다. 이를 위해 송신노드와 수신노드에서의 RSSI를 50초 동안 측정하여 비교하였으며 그 편차에 대한 결과를 그림 5에 나타내었다. 실험을 통해 프레임을 전송하면서 수신노드에서 측정한 RSSI(RxRSSI)와 송신노드에서 측정한 RSSI(TxRSSI)의 패턴이 거의 유사한 것을 확인할 수 있었으며, 그 편차는 ±0.5 이하의 범위에 존재하는 것을 결과를 통해 확인할 수 있다. 일반적으로 수신노드에서 측정된 정보를 가지고 무선 채널의 상태를 판단하는 것이 정확하지만, 그림 6의 실험결과를 통해 송신노드에서 측정된 RSSI를 이용해서 무선 채널의 상태를 예측하는 기법이 적용가능하다는 것으로 판단할 수 있다.

그림 7의 결과는 기존의 전송률 적응기법에서 대표적인 RBAR와 ARF의 실험 결과를 나타낸 것이다. 50초 동안의 실험에서 29.5초에서 30.5초까지, 1초 동안의 무선 채널의 상태 변화와 RBAR, ARF 각각의 전송모드 조절을 보여준다. 그림 7(b)에서 확인할 수 있듯이 RBAR는 SNR을 기반으로 채널 상태를 예측하고 전송모드를 조절하므로 채널 상태 변화에 빠르게 반응하는 것을 보여준다. 하지만 ARF의 경우, 그림 7(c)와 같이 한 단계씩 순차적인 전송모드 조절에 의해 채널 상태 변화에 빠르게 반응하지 못하는 것을 볼 수 있다.

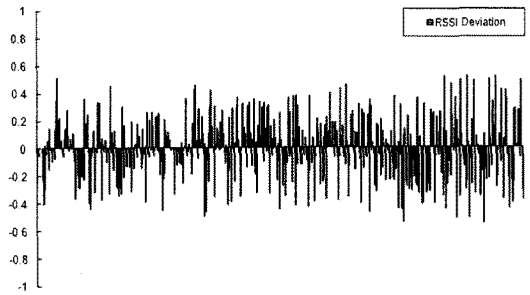
그림 7과 동일한 실험 조건에서, 본 논문에서 제안하는 SARA 기법의 성능 측정 결과를 그림 8에 나타내었다. SARA 기법의 경우, RSSI를 기반으로 채널 상태를 판단하고 전송모드를 결정하므로 RBAR와 유사하게 채널 상태 변화에 빠르게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 RBAR, ARF, SARA 기법의 평균 처리율 성능 비교를 위해 50초 동안의 실험 결과를 나타낸 것으로 본 논문에서 제안하는 SARA 기법이 기존 기법들에 비해 큰 성능 향상을 보임을 확인할 수 있다. 정량적으로 RBAR와 ARF는 각각 평균 2.77, 2.76 Mbps의 처리율을 보이는 반면, SARA 기법은 평균 3.49 Mbps의 성능을 보였다.



(a) 송신노드에서 측정한 RSSI



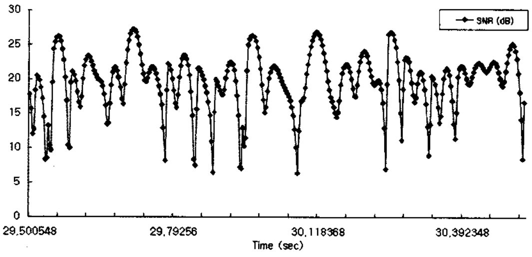
(b) 수신노드에서 측정한 RSSI



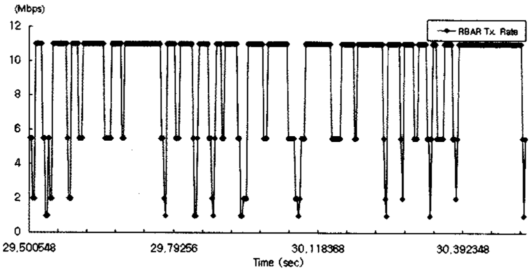
(c) TxRSSI와 RxRSSI의 편차 비교

그림 6 송신노드와 수신노드에서의 RSSI 비교

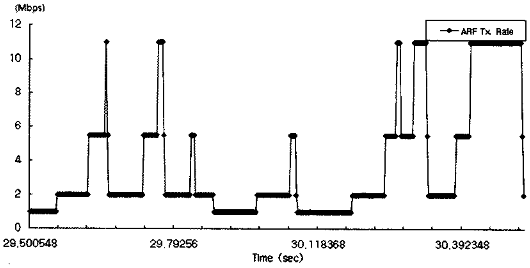
각각의 전송률 적응기법들의 성능 비교를 위해 전체 전송한 프레임 수, 재전송한 프레임 수, 폐기된 프레임 수를 표 2에 정리하였다. RBAR의 경우, 무선 채널의 상태 변화에 빠르게 반응하지만, 저속의 전송모드로 전송되는 RTS/CTS 교환을 모든 데이터 프레임마다 사용하므로 무선 채널의 대역폭을 낭비하게 된다. 하지만 프레임 단위로 채널 상태를 측정하고 전송모드를 결정하므로 프레임의 재전송 비율을 낮추고 안정적으로 전달하게 된다. ARF의 경우, 무선 채널 상태 변화가 작은 동안에는 안정적인 성능을 보이지만 채널 상태 변화가 커지면, 적절한 전송모드로 조절하는 시간이 오래 걸리



(a) 무선 채널의 상태 변화



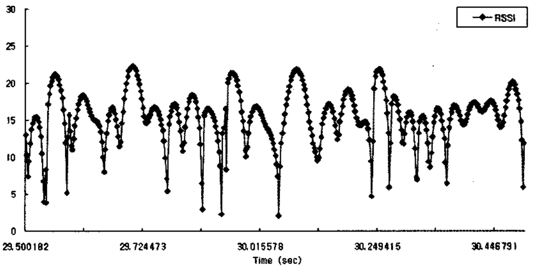
(b) RBAR의 전송모드 변화



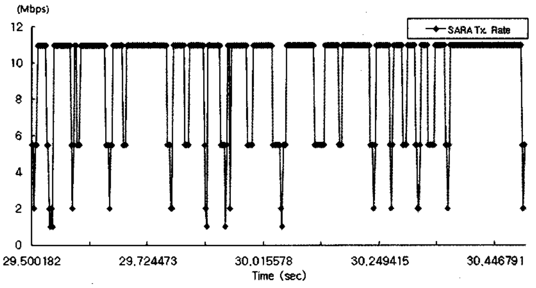
(c) ARF의 전송모드 변화

그림 7 RBAR와 ARF의 전송모드 조절

게 된다. 따라서 재전송되는 프레임의 수가 증가하게 되며, 상태 변화가 심할 경우에는 재전송 허용횟수를 초과하거나 타임아웃이 발생하여 프레임을 폐기하게 된다. 본 논문에서 제안하는 SARA 기법의 경우, 채널 상태 변화에 빠르게 반응하여 전송모드를 결정하고, RTS/CTS 교환을 선택적으로 사용하므로 기존의 RBAR나 ARF에 비해 전체 전송된 프레임 수가 증가하게 되고 결과적으로 무선 채널의 대역폭 사용에 대한 효율성을 높이게 된다. SARA 기법에서는 이전에 전송된 프레임의 ACK를 통해 채널 상태를 예측하고 전송모드를 결정하기 때문에 RBAR에 비해 전송모드 결정의 정확성이 다소 떨어지게 되고, 그로인해 재전송하는 프레임의 수는 증가하게 되지만, ARF에 비해서는 재전송 프레임의 수를 크게 낮추게 된다. 또한 첫 번째 프레임 전송이 실패할 경우, RTS/CTS 교환을 통해 재전송을 시도하므로 RBAR와 같이 프레임을 안정적으로 전달하게 된다.



(a) 무선 채널의 상태 변화



(b) SARA의 전송모드 변화

그림 8 SARA의 전송모드 조절

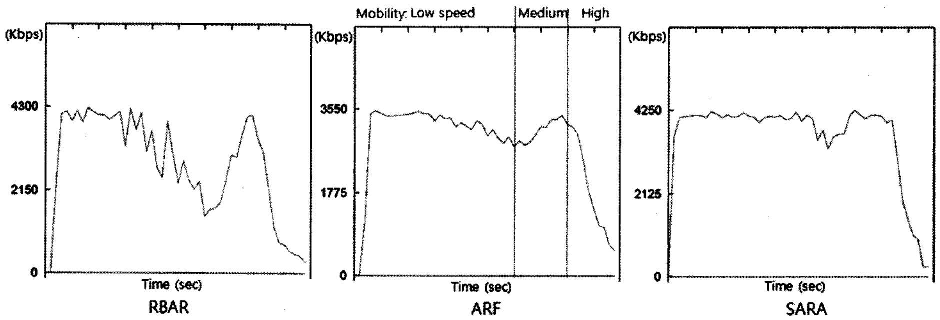


그림 9 처리율 비교

표 2 성능 비교 결과

	RBAR	ARF	SARA
전체 전송된 프레임 수	17,306	17,292	21,830
재전송된 프레임 수	215	1,203	667
폐기된 프레임 수	0	5	0
평균 처리율	2.77 Mbps	2.76 Mbps	3.49 Mbps

표 3 채널 경쟁 상황에서의 성능 비교

적응기법	무선 노드	전송 프레임	전체 전송 프레임
ARF	Node 1	1,977	7,979
	Node 2	2,356	
	Node 3	2,167	
	Node 4	1,479	
RBAR	Node 1	4,592	17,417
	Node 2	5,716	
	Node 3	3,397	
	Node 4	3,712	
SARA	Node 1	4,878	22,080
	Node 2	9,607	
	Node 3	5,807	
	Node 4	1,788	

무선 노드의 수를 증가시켜 무선 채널에 대한 경쟁을 심화시킨 상태에서의 전송률 적응기법들의 성능 비교 실험을 수행하였다. 무선 노드의 수는 2개, 4개로 증가시키면서 실험을 수행하였으며 두 실험의 결과 모두, 기존의 RBAR나 ARF에 비교하여 제안하는 SARA 기법이 평균 처리율을 높임으로써 무선랜 대역폭을 효율적으로 사용하는 것을 확인할 수 있었다. 논문에서는 무선 노드의 수를 4개로 설정하고 실험한 결과만을 표 3에 나타내었다. ARF 기법의 경우, 채널 상태 변화에 대한 느린 반응과 재전송된 프레임, 폐기된 프레임의 증가에 따라 RBAR와 SARA 기법에 비교하여 성능이 크게 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 제안하는 SARA 기법의 경우, 표 2의 결과와 유사하게 ARF, RBAR에 비해 전체적인 성능이 향상하는 것을 확인할 수 있었지만, AP와 멀리 위치하는 노드의 경우, 가까운 노드에 비해 낮은 전송모드의 선택으로 인해 노드간의 성능 차이가 커지는 현상을 확인할 수 있었다. 이러한 노드간의 성능 차이는 재전송 프레임 수의 증가로 인해 비교 대상인 RBAR 기법에 비해 더 큰 편차를 보이는 현상을 보였다.

시뮬레이션을 통한 성능 비교 실험을 통해 제안하는 SARA 기법이 송신노드에서 측정된 RSSI를 기반으로 무선 채널 상태 변화에 빠르게 반응하며 기존의 전송률 적응기법들이 가지는 문제점들을 개선하여 보다 향상된 성능을 가질 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 IEEE 802.11 무선랜의 BSS 모드에서 송신노드에서 측정된 신호세기를 기반으로 무선 채널의 상태를 예측하고, 이를 기반으로 전송모드를 결정하여 무선 네트워크의 채널 대역폭 사용의 효율성을 높일 수 있는 새로운 전송률 적응기법으로서 SARA 기법을 제안하였다. 제안한 SARA 기법은 무선랜 디바이스에서 일반적으로 지원하는 RSSI를 기반으로 채널 상태를 예측하고 이를 기반으로 최적의 성능을 가질 것으로 기대되는 전송모드를 선택하게 된다. 선택적인 RTS/CTS 교환을 통해 무선랜의 제한된 채널 대역폭 사용에 대한 효율성을 향상시켰으며, 각각의 전송모드의 동작가능범위를 지속적으로 갱신함으로써 현재 무선 채널의 상태를 반영하여 전송모드를 결정할 수 있도록 하였다. 이와 같은 특징을 통해 채널 상태 변화에 대한 반응성, 실제 디바이스에 대한 구현 문제점, 그리고 기존 무선랜 표준과의 호환성에 대한 문제점 등 기존 전송률 적응기법이 가지고 있는 문제점을 개선하였다. 시뮬레이션을 통한 성능 평가 및 비교를 통해 SARA 기법이 기존 기법들의 문제점을 개선함으로써 무선 채널의 대역폭 사용에 대한 효율성을 효과적으로 높일 수 있음을 확인할 수 있었다. 향후, 실제 무선랜 디바이스에서의 구현을 통해 제안하는 SARA 기법의 실질적인 적용 가능성에 대한 검증을 수행할 것이다.

참 고 문 헌

[1] IEEE 802.11, part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specifications, IEEE Std. 802.11-1999, Aug. 1999.

[2] IEEE 802.11b, part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical layer (PHY) specifications: higher-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band, supplement to IEEE 802.11 Std., Sep. 1999.

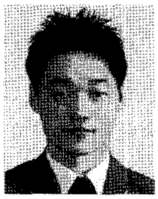
[3] A. Kamerman and L. Monteban, "WaveLAN-II: a high-performance wireless LAN for the unlicensed band," *Bell Labs Technical Journal*, vol.2, no.3, pp. 118-133, Aug. 1997.

[4] G. Holland, N. Vaidya, and P. Bahl, "A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks," *ACM MOBICOM 2001*, pp. 236-250, Jul. 2001.

[5] J. Kim, S. Kim, S. Choi, and D. Qiao, "CARA: collision-aware rate adaptation for IEEE 802.11 WLANs," *IEEE INFOCOM*, 2006.

[6] Q. Pang, V. Leung, and S. Liew, "A rate adaptation algorithm for IEEE 802.11 WLANs based on MAC-layer loss differentiation," *Broadnets 2005 Wireless Networking Symposium*, Oct. 2005.

[7] S. Wong, H. Yang, S. Lu, and V. Bharghavan, "Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks," *ACM/IEEE MOBICOM*, 2006.
[8] I. Haratcherev, J. Taal, K. Langendoen, R. Lagendijk, and H. Sips, "Automatic IEEE 802.11 rate control for streaming applications," *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2005.
[9] J. Pavon and S. Choi, "Link adaptation strategy for IEEE 802.11 WLAN via received signal strength measurement," *ICC*, May 2003.
[10] K. Balachandran, S. Kadaba, and S. Nanda, "Channel quality estimation and rate adaptation for cellular mobile radio," *IEEE JSAC*, Vol. 17, pp. 1244-1256, Jul. 1999.
[11] C. Chen, E. Seo, H. Kim, and H. Luo, "Self-learning collision avoidance for wireless networks," *IEEE INFOCOM*, 2006.
[12] J. Bardwell, "Converting signal strength percentage to dBm values," www.wildpackets.com, Nov. 2002.
[13] The network simulator ns-2, http://www.isi.edu/nanam/ns/
[14] J. Punnoose, V. Nikitin, and D. Stancil, "Efficient simulation of Ricean fading within a packet simulator," *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 2, pp. 764-767, Sep. 2000.
[15] Carnegie Mellon University, Antenna and radio communications group, http://www.ece.cmu.edu/wireless



이 선 헌
2003년 광운대학교 전자공학부 학사. 2005년 광운대학교 전자통신공학과 석사. 2005년~현재 광운대학교 전자통신공학과 박사과정. 관심분야는 인터넷 QoS, 유.무선 비디오 스트리밍, Cross-Layer 기술

정 광 수
1981년 한양대학교 전자공학과 학사 1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1991년 미국 University of Florida 전기공학과 박사(컴퓨터공학전공). 1983년~1993년 한국전자통신연구원 선임연구원. 1991년~1992년 한국과학기술원 대우 교수. 1993년~현재 광운대학교 전자공학부 교수(정보통신 연구원). 관심분야는 인터넷 QoS, 유.무선 비디오 스트리밍, 센서네트워크