

무선 네트워크에서 수신신호대잡음비 기반 전송속도 조절기의 성능 비교

*정하경, **권태경, **최양희
서울대학교

*{hkjung}@mmlab.snu.ac.kr, **{tkkwon, yhchoi}@snu.ac.kr

Performance Evaluation of SNR-based Rate Adaptation Algorithms in Wireless Networks

*Hakyung Jung, **Ted "Taekyoung" Kwon, **Yanghee Choi
Seoul National University

요 약

정확한 채널 정보를 이용할 수 있는 SNR 기반의 전송속도 조절기는 ACK 프레임의 전송 성공 여부 기록을 기반으로 한 전송속도 조절기에 비하여 대체로 우월한 성능을 보인다. 단, 수신 단말의 SNR을 RTS/CTS 프레임 교환 등을 통해 송신 단말로 전달하는 오버헤드가 정확한 채널 정보의 이득을 초과하는 경우에는 그 성능이 역전된다. 따라서, 피드백 오버헤드를 경감하기 위하여 직접적으로 SNR을 전달하지 않고, 무선 채널의 대칭성을 가정하여 간접적으로 수신 단말의 SNR을 추정하는 기법들이 최근 제안된 바 있다. 본 논문은 수신 단말로부터 직접적으로 SNR 정보를 피드백 받는 전송속도 조절기와 채널 대칭성을 가정하여 간접적으로 SNR 정보를 추정하는 전송속도 조절기의 성능을 비교 분석한다. 이를 위해 Nakagami 페이딩 환경에서 전송속도 조절기의 성능 분석 모델을 제시하고, 이를 통해 추정된 SNR 및 추정시간과 실제 프레임 전송시간과의 시간 차가 각 기법의 성능에 큰 영향을 줌을 확인하였다. 향후, 제안된 성능 분석 모델은 주어진 환경에 따라 적합한 SNR 추정법을 이용하는 전송속도 조절기의 설계에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

IEEE 802.11은 다양한 물리계층을 정의하고 있다. 예를 들어, 5GHz 밴드에서 사용되는 OFDM 물리계층(802.11a)은 BPSK(Binary Phase Shift Keying), QPSK(Quadrature Phase Shift Keying), 16-QAM(Quadrature Amplitude Modulation), 64-QAM의 네 가지 변조 기법과 세 가지 콘볼루션 코드의 코드율(code rate) 조합을 통해 표 1과 같은 여덟 가지 전송모드를 정의하고 있다 [1].

일반적으로 전송속도와 전송 오류는 상호이율배반(tradeoff) 관계에 있다. 높은 전송속도는 더 많은 전송 오류를 유발하며, 전송 오류를 줄이기 위해서는 전송속도를 낮춰야 한다. 전송 오류는 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)에 대한 함수로 표현될 수 있으며, SNR이 높을수록 전송 오류는 줄어들게 된다. 따라서, 전송 단말은 전송 오류가 정해진 기준보다 높아지지 않으면서도, 전송율은 가장 높은 전송모드를 선택하여 데이터를 전송해야 한다. 한편, 수신 단말의 채널 상황은 단말의 이동 등에 의해 시간에 따라 변하므로, 송신 단말은 수신 단말의 현재 채널 상황을 정확히 파악하여, 채널 상황에 맞는 최적의 전송모드를 선택하여야 한다.

전송속도 조절을 위해 수신 단말의 채널 상황을 추정하는 방법은 크게 SNR과 같은 물리계층의 메트릭을 이용하는 방법과 ACK 프레임의 전송 성공 여부 기록과 같은 접근제어계층의 메트릭을 이용하는 방법이 있다. 최근 연구에 따르면 전자를 기반으로 한 전송속도 조절기가 후자의 그것에 비해 대체로 우월한 성능을 보이는 것으로 나타났다 [2][3][4]. 다만, 수신 단말의 SNR을

RTS/CTS 프레임 교환을 통해 송신 단말로 전달하기 위한 오버헤드가 큰 상황에서는 반대의 성능이 나타나기도 한다. 따라서, 이러한 피드백 오버헤드를 경감하기 위하여 무선 채널의 대칭성을 가정하여 수신 단말의 SNR을 추정하는 기법이 연구된 바 있다 [5][6][7][8][9].

본 논문에서는 수신 단말로부터 직접적으로 SNR 정보를 피드백 받는 전송속도 조절기와 채널 대칭성을 가정하여 수신 단말의 SNR을 간접적으로 추정하는 전송속도 조절기의 성능을 비교 분석한다. 전자의 대표적인 기법은 RBAR이다 [2]. RBAR는 DATA 프레임의 전송 이전에 RTS/CTS 프레임 교환을 통해 SNR 정보를 피드백 한다. 후자의 대표적인 기법은 CHARM이다 [5]. CHARM은 무선 채널의 대칭성을 가정하여 잠재적 수신 단말이 전송하는 프레임의 SNR을 측정하여 수신 단말의 SNR 또한 이와 같을 것이라 추정한다.

RBAR의 경우 RTS/CTS 프레임 교환을 통한 피드백 오버헤드가 단점이지만, 수신 단말로부터의 정확한 채널 정보를 피드백 받고, 또한 피드백을 받은 직후에 DATA 프레임 교환이 즉각적으로 이루어지는 장점이 있다. 반면, CHARM의 경우 피드백 오버헤드는 없으나 무선 채널

표 1. IEEE 802.11a의 여덟가지 전송모드

Mode	Modulation	Code Rate	Data Rate (Mbps)	Data bits per symbol
1	BPSK	1/2	6	24
2	BPSK	3/4	9	36
3	QPSK	1/2	12	48
4	QPSK	3/4	18	72
5	16-QAM	1/2	24	96
6	16-QAM	3/4	36	144
7	64-QAM	2/3	48	192
8	64-QAM	3/4	54	216

이 대칭적이지 않은 경우에는 채널 추정의 정확성을 담보할 수 없고, 채널 추정과 DATA 프레임 전송 간의 시간 지연이 있어, 지연 시간 동안 무선 채널 상황이 변화될 우려가 있다. 따라서, 두 기법은 주어진 상황에 따라 성능 우위가 달라질 수 있으며 이를 알아보는 것이 본 논문의 목적이다.

본 논문은 이하 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장은 RBAR 와 CHARM 의 성능 비교를 위한 분석 모델을 제안하고, 3 장에서는 이 분석 모델의 수치 결과를 논하며, 4 장에서 맺는다.

2. 성능 분석

본 장에서는 RBAR 와 CHARM 의 성능 비교를 위한 전송속도조절기의 분석 모델을 제시한다. RBAR 와 CHARM 은 모두 추정된 SNR 을 기반으로 전송속도를 조절하므로 추정된 SNR 에 대하여 전송속도를 결정하는 방법이 먼저 정해져야 한다. 일반적으로 전송모드 선택정책으로는 SNR 임계값을 기준으로 전송모드를 정하는 기법이 많이 이용되고 있다 [2][5][6][7][8][9][10][11][12]. 이러한 기법에서는 추정된 수신 단말의 SNR 값을 요구되는 성능기준에 따라 각 전송모드에서 정해진 임계값들과 비교하며, 조건을 충족하는 전송모드 중 가장 높은 전송율을 지원하는 전송모드가 선택된다. 일반적으로 이동통신에서 송수신 간의 데이터통신시 프레임에러율(Frame Error Rate, FER)이 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 정도의 목표 성능을 유지하여야 양질의 통신을 보장할 수 있다고 알려져 있으며, 본 논문에서는 평균 프레임에러율이 10^{-1} 이 되도록 각 전송모드의 임계값을 산출하여, 이에 따라 속도조절기가 동작하도록 하였다.

수신단말이 프레임을 수신 할 때의 SNR 이 γ 일 때 프레임에러확률은 다음과 같이 근사 될 수 있다 [13].

$$FER_n(\gamma) \approx \begin{cases} 1, & \text{if } 0 < \gamma < \gamma_n^0 \\ a_n \exp(-g_n \cdot \gamma), & \text{if } \gamma \geq \gamma_n^0 \end{cases} \quad (1)$$

이때, n 은 전송모드의 색인, γ 은 수신 프레임의 SNR 을 의미한다. a_n, g_n, γ_n^0 은 전송모드와 프레임의 길이에 따라 달라지며, 시뮬레이션을 통해 얻은 프레임에러확률 분포를 지수함수로 근사함으로써 구할 수 있다. 표 2 는 프레임의 길이가 1000 bytes 일 때 각 전송모드의 a_n, g_n, γ_n^0 값을 보여준다.

주어진 수신 프레임의 SNR γ 에 대하여 전송모드 n 이 선택되었다고 가정하자. 하지만, 무선 채널 상태는 계속 변화하므로 전송 단말이 새로운 프레임을 전송할 때는 수신 단말에서 측정되는 SNR 에 변화가 발생하게 된다. 이 때의 SNR 이 추정되는 시점을 t , DATA 프레임이 전송되는 시점을 $t + \tau$ 라 하고, 각 시점에서의 SNR 을 각각 γ, γ_τ 라고 하면, Nakagami 무선 채널에서의 이들의

$$p_{\gamma_\tau/\gamma}(\gamma_\tau/\gamma) = \frac{m}{(1-\rho)\bar{\gamma}} \left(\frac{\gamma_\tau}{\rho\bar{\gamma}} \right)^{(m-1)/2} I_{m-1} \left(\frac{2m\sqrt{\rho\gamma\gamma_\tau}}{(1-\rho)\bar{\gamma}} \right) \exp \left(-\frac{m(\rho\gamma + \gamma_\tau)}{(1-\rho)\bar{\gamma}} \right) \quad (2)$$

여기서 $I_{m-1}(\cdot)$ 은 (m-1)th-order modified Bessel function of the first kind 이며, ρ 는 γ 와 γ_τ 사이의 상관인자이다. ρ 는 이동속도, 중심주파수의 영향을 받으며, 특히 τ 가 커질수록 작은 값을 갖게 된다.

식 (1), (2)를 이용하면 수신 단말의 SNR 이 γ 로 주어진 후 τ 의 지연시간 후 다음 프레임이 전송될 때의 프레임 전송에러율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$FER(l, \gamma, \tau) = \int_0^{+\infty} FER_{n,l}(\gamma_\tau) p_{\gamma_\tau/\gamma}(\gamma_\tau/\gamma) d\gamma_\tau \quad (3)$$

이때, 프레임에러율 $FER_{n,l}(\gamma_\tau)$ 의 전송모드 n 은 γ_τ 가 아닌 γ 에 따라 결정되지만, 실제 최종적인 프레임에러율은 γ 가 아닌 γ_τ 에 의해 결정됨에 주목해야 한다.

본 성능분석 모델의 최종 목표인 시스템의 단위시간당 실제처리량(goodput)은 아래와 같은 절차로 구한다. 먼저, 재전송을 고려하지 않으면 프레임의 길이가 1 일 때, 예상되는 성공적으로 전송되는 프레임 길이는 다음과 같다.

$$E[data](l, \gamma, \tau) = (1 - FER(l, \gamma, \tau)) \cdot l \cdot 8 \quad (4)$$

예상 전송 시간 $E[\mathcal{D}_{data}]$ 은 RTS/CTS 프레임 교환을 사용하는지의 여부에 따라 다른 값을 갖는다. 먼저 RTS/CTS 프레임 교환을 사용할 때의 $E[\mathcal{D}_{data}]$ 은

$$E[\mathcal{D}_{data}](l, \gamma) = T_{RTS} + T_{CTS} + T_{bkoff} + T_{data}(l, \gamma) + 3 \cdot tSIFSTime + T_{ack} + tDIFSTime \quad (5)$$

이며, RTS/CTS 프레임 교환을 사용하지 않으면

$$E[\mathcal{D}_{data}](l, \gamma) = T_{bkoff} + T_{data}(l, \gamma) + 3 \cdot tSIFSTime + T_{ack} + tDIFSTime \quad (6)$$

와 같다. RBAR 의 경우 채널 상태 정보 전달을 위해 RTS/CTS 프레임 교환을 사용하므로 $E[\mathcal{D}_{data}]$ 의 계산에 식 (5)가 사용되며, CHARM 의 경우 식 (6)이 사용된다.

따라서, 예상되는 goodput 은 식 (4),(5),(6)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathcal{G}(l, \gamma, \tau) = \frac{E[data](l, \gamma, \tau)}{E[\mathcal{D}_{data}](l, \gamma)} \quad (7)$$

이 때, RBAR 의 τ 는 $T_{RTS} + T_{CTS} + 2 \cdot tSIFSTime$ 로 일정하나, CHARM 의 τ 는 수신 단말의 트래픽 전송에 따라 가변적인 값이 된다.

표 2. 프레임에러율 근사식의 파라미터

Mode	a_n	g_n	γ_n^0 (dB)
1	77.32	6.957	-2.04137
2	31.12	2.16	2.01833
3	16.8	0.8833	5.04353
4	107.9	0.5962	8.94966
5	24.13	0.2011	11.9949
6	41.51	0.09445	15.9603
7	33.45	0.07025	16.9867
8	12.27	0.03908	18.0723

결합 확률밀도함수는 다음과 같이 표현될 수 있다 [14].

3. 수치 결과

성능 분석의 수치 결과를 살펴보기 위해 다음과 같은 설정이 사용되었다. 각 프레임의 payload 의 길이는 1000 bytes 로 하였다. 채널의 평균 SNR 은 15 dB 로 하였으며, 전송속도 조절기는 목표 프레임에러율 10^{-1} 을 기준으로 작동하도록 하였다. 무선 채널의 특성은 Nakagami 페이딩을 따르며, Nakagami 페이딩의 파라미터 m 은 1 로 설정하여 Rayleigh fading 과 동일하도록 하였다.

시스템의 물리 계층에는 IEEE 802.11a 표준의 OFDM PHY 가 사용되는 것을 가정하였다. IEEE 802.11a 는 5GHz 밴드에서 20MHz 의 채널폭을 사용하며, 각 20MHz 채널은 52 개의 서브캐리어로 구성되어 있다. 802.11 OFDM 물리 계층에서 정의한 복수의 변조 기법과 콘볼루션 코드의 코드율 조합을 통하여 표 1 과 같이 총 여덟 가지의 전송 모드를 사용하였으며, **오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.** 3 과 같은 물리계층의 특성값을 사용하였다.

표 3. IEEE 802.11a OFDM 물리계층 파라미터

Properties	Value	Comments
tSlotTime	9 μ s	Slot time
tSIFSTime	16 μ s	SIFS time
tDIFSTime	34 μ s	DIFS time
aCWmin	15	Min contention window size
aCWmax	1023	Max contention window size
tSymbol	4 μ s	OFDM symbol time

그림 1 는 평균 SNR 이 15dB 이고, 측정 SNR 이 5dB 일 때의 RBAR 와 CHARM 의 goodput 을 비교한 것이다. 그림의 X 축은 CHARM 에서 SNR 을 측정하는 후 다음 프레임을 전송할 때까지의 지연시간을 의미한다. (RBAR 의 경우 RTS/CTS 프레임 교환과정에서 SNR 을 측정하는 후 다음 프레임을 바로 전송하므로 고정적인 시간이 소요되므로, 그림의 X 축에 영향을 받지 않음에 유의해야 한다.)

수치결과는 CHARM 에서 SNR 을 측정하는 후 다음 프레임을 전송할 때까지의 시간 차이에 따라 CHARM 의 성능이 크게 달라질 수 있으며, 성능이 RBAR 를 상회할 수도 혹은 하회할 수도 있음을 보여준다. 시간 차이가 매우 짧은 경우에는 측정된 SNR 을 기반으로 정확하게 전송속도를 조절함으로써, RTS/CTS 프레임 교환 오버헤드를 가지는 RBAR 에 비해서 CHARM 이 좀 더 나은 성능을 보여준다. 하지만, 점차 시간 차이가 길어짐에 따라 무선 채널의 상태가 변하게 되고, CHARM 이 측정하는 SNR 정보는 점차 부정확하게 된다. 따라서, CHARM 의 성능이 점차 악화되어 RBAR 보다 낮은 goodput 을 보이게 된다. 시간 차이가 0.01 초 이상이 되면 채널의 평균 SNR 이 15dB 이므로 채널의 SNR 이 점차 이에 수렴할 가능성이 높아진다. 따라서, 긴 시간 차에 의해서 SNR 정보의 부정확성은 높아졌지만, 채널이 SNR 이 높은 쪽으로 변화함에 따라 결과적인 프레임 에러율은 낮아지는 결과를 낳게 된다. 이에 CHARM 의 성능은 RBAR 를 다시 상회하게 된다.

그림 2, 그림 3, 그림 4 는 각각 평균 SNR 이 15dB 이고, 측정 SNR 이 10dB, 15dB, 20dB 일 때의 RBAR 와 CHARM 의 goodput 을 비교한 것이다. 그림의 축은 그림 1 와 같다. 그림 2, 그림 3, 그림 4 의 공통적인 결과는 SNR 을 측정하는 후 다음 프레임을 전송할 때까지의 시간 차가 작을 때는 RBAR 의 채널 피드백 전송 오버헤드에 의해 CHARM 이 더 나은 성능을 보이지만, 시간 차가 점차 커짐에 따라 CHARM 이 측정하는 SNR 의 부정확도가 점차 증대되어 결국 RBAR 의 성능이 CHARM 의 그것을 능가하는 양상

을 보이게 된다.

그림 2 은 그림 1 와 마찬가지로 SNR 추정 이후 시간이 지남에 따라 점차 채널 상태가 향상되어 CHARM 의 goodput 이 하락 후 다시 회복되는 양상을 보이지만, 긴 시간 차가 소요된 후에도 goodput 이 역전되지는 않는다. 그림 3 에서는 장기적인 채널의 상태가 추정 SNR 과 같기 때문에 SNR 추정 이후의 시간 차는 추정 SNR 을 부정확하게 하는 방향으로 기능하기 때문에 시간 차가 증가할 수록 goodput 은 감소하기만 하는 양상을 보인다. 그림 4 는 반대로 장기적인 채널의 상태가 추정 SNR 보다 악화되는 경우이다. 따라서 이때는 CHARM 이 가진 추정 SNR 의 부정확성이 극단적으로 높아져 goodput 이 매우 큰 폭으로 떨어지게 된다.

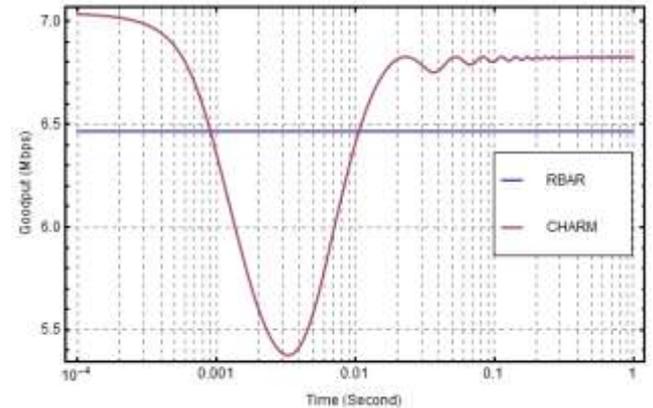


그림 1. RBAR 와 CHARM 의 goodput 비교 (평균 SNR=15dB, 측정 SNR=5dB)

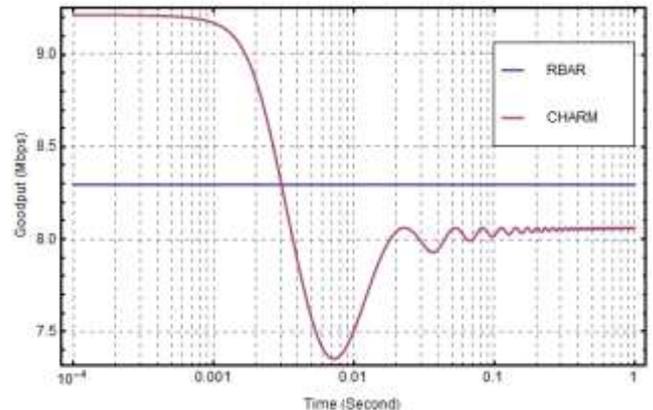


그림 2. RBAR 와 CHARM 의 goodput 비교 (평균 SNR=15dB, 측정 SNR=10dB)

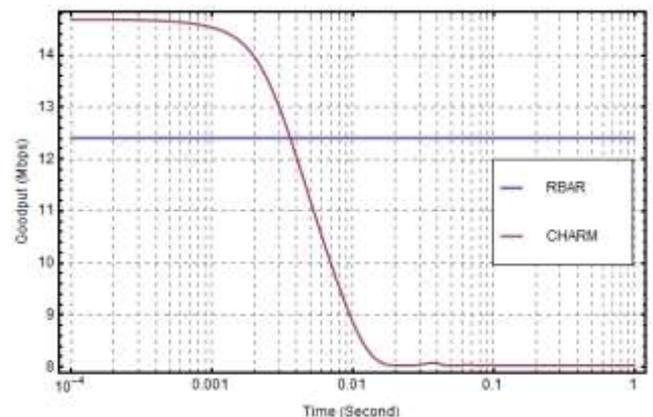


그림 3. RBAR 와 CHARM 의 goodput 비교 (평균 SNR=15dB, 측정 SNR=15dB)

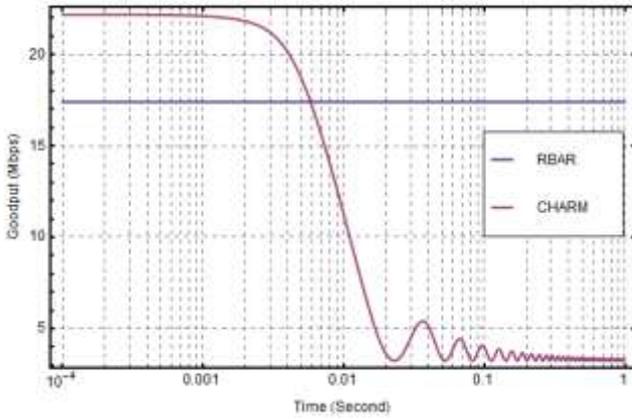


그림 4. RBAR 와 CHARM 의 goodput 비교 (평균 SNR=15dB, 측정 SNR=20dB)

4. 결론

본 논문에서는 Nakagami 채널에서 직접적으로 수신 단말의 SNR 을 송신 단말로 피드백하는 전송속도 조절기 (RBAR)와 수신 단말의 프레임 전송을 엿들어 간접적으로 수신 단말의 SNR 을 추정하는 전송속도 조절기(CHARM)의 성능을 비교하였다. 본 논문에서 제안한 분석 모델의 수치 결과에 의하면, 후자의 전송속도 조절기의 성능은 추정 시점과 실제 DATA 프레임의 전송시점의 시간 차에 큰 영향을 받았다. 향후, 좀 제안된 성능 분석 모델을 좀 더 확장할 계획이며, 제안된 성능 분석 모델을 주어진 환경에 따라 적합한 SNR 추정법을 이용하는 전송속도 조절기의 설계에 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] IEEE 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

[2] G. Holland, N. Vaidya, and V. Bahl. A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multihop Wireless Networks. ACM MOBICOM, 2001.

[3] J. Camp, E. Knightly, "Modulation rate adaptation in urban and vehicular environments: cross-layer implementation and experimental evaluation," ACM Mobicom 2008.

[4] H. Jung, K. Cho, Y. Seok, T. Kwon, Y. Choi, "RARA: Rate Adaptation Using Rate-Adaptive Acknowledgment for IEEE 802.11 WLANs," IEEE CCNC 2008.

[5] G. Judd, X. Wang, P. Steenkiste, Efficient channel-aware rate adaptation in dynamic environments, in: MobiSys '08: Proceed-ing of the 6th international conference on Mobile systems, applica-tions, and services, ACM, New York, NY, USA, 2008, pp. 118-131.

[6] J. Pavon, S. Choi, Link adaptation strategy for ieee 802.11 wlan via received signal strength measurement, in: Communications, 2003. ICC 2003.

[7] D. Qiao, S. Choi, K. G. Shin, Goodput analysis and link adaptation for ieee 802.11a wireless lans,

IEEE Transactions on Mobile Computing 1 (4) (2002) 278-292.

[8] J. Zhang, K. Tan, J. Zhao, H. Wu, Y. Zhang, A practical snr-guided rate adaptation, in: INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE, 2008, pp. 2083 -2091.

[9] L. Verma, S. Kim, S. Choi, S.-J. Lee, Agile rate control for ieee 802.11 networks, in: FGIT '09: Proceedings of the 1st International Conference on Future Generation Information Technology, Springer-Verlag, Berlin,Heidelberg, 2009, pp. 237-245.

[10] K. Balachandran, S.R.Kadaba, and S.Nanda, "Channel quality estimation and rate adaption for cellular mobile radio," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 17(7):1244-1256, July, 1999.

[11] A. Goldsmith and S.G. Chua, "Adaptive coded modulation for fading channels," IEEE Transactions on Communications, 46:595-602, May 1998.

[12] T. Ue, S. Sampei, N. Moriga, and K. Hamaguchi, "Symbol rate and modulation level-controlled adaptive modulation/TDMA/TDD system for high-bit-rate wireless data transmission," IEEE Transactions on Vehicular Technology, 47(4):1134-1147, November 1998.

[13] Q. Liu, S. Zhou, and G.B. Giannakis, "Cross-Layer combining of adaptive Modulation and coding with truncated ARQ over wireless links," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 3, no. 5, pp. 1746-1755, Sep. 2004.

[14] M. Alouini, A.J. Goldsmith, "Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels," Wireless Personal Communications, vol. 13, no. 1-2, pp. 119-143, 2000

이 연구를 위해 연구장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터연구소에 감사드립니다. 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음

[10035245: 미래인터넷에서의 이동환경 및 네트워크 다양성 지원구조 연구].