

다 계층 재전송 방식을 사용하는 무선 통신시스템의 종단간 성능 분석

고광춘^o, 김재현
아주대학교 전자공학과

End-to-End Performance Analysis of Wireless Communication System when using Cross-Layer Retransmission Scheme

Kwang-Chun Go^o, Jae-Hyun Kim
Department of Electronics Engineering, Ajou University
{light3754, jkim}@ajou.ac.kr,

요 약

무선 통신시스템에서 사용자에게 제공되는 서비스의 품질을 향상시키기 위하여 다 계층 재전송 방식이 제안되었다. 다 계층 재전송 방식은 무선 채널 상황에 따라 변조 방식과 부호화율을 바꾸어주어 무선 채널에서 데이터의 전송 효율성과 신뢰성을 향상시켰다. 하지만 기존 연구에서 다 계층 재전송 방식이 무선 통신시스템의 종단간 성능에 미치는 영향에 대해서는 분석되어지지 않았다. 본 논문에서는 다 계층 재전송 방식이 사용되는 무선 통신시스템의 종단간 성능 분석 모델을 제시한다. 또한 분석된 모델을 이용하여 다 계층 재전송 방식에 따른 무선 통신시스템의 종단간 성능을 비교 분석하도록 한다.

1. 서론

최근 무선이동통신 사용자가 증가함에 따라 다양한 서비스의 요구뿐만 아니라 높은 수준의 서비스 품질에 대한 요구가 증가하고 있다. 특히 서비스의 품질은 전송 속도와 전송 신뢰도, 전송 지연에 의해 결정된다. 하지만 무선 통신시스템에서는 무선채널에서의 채널감쇠로 인해 전송 속도뿐만 아니라 전송 신뢰도가 감소할 수 있으며, 이는 서비스의 품질을 저하시킬 수 있다. 따라서 무선 통신시스템에서 무선채널에서 데이터의 전송 속도와 신뢰성을 높이기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다.

최근 연구에서는 무선채널에서 데이터의 전송 효율성과 신뢰성을 높이기 위해 재전송 방식과 AMC(Adaptive Modulation and Coding) 기법을 함께 사용하는 다 계층 재전송 방식을 제안하였다[1][2]. [1]에서는 HARQ와 AMC 기법을 함께 사용하는 경우 HARQ의 종류와 패킷의 크기, 그리고 채널 상황에 따른 평균 대역효율성의 변화에 대한 분석을 수행하였으며, [2]에서는 ARQ만을 사용하는 경우와 ARQ와 AMC 기법이 함께 사용되는 경우의 성능을 평균 대역효율성과 PER 측면에서 비교 분석하여 제

안된 다 계층 재전송 방식의 우수성을 검증하였다. 하지만 기존의 연구에서는 다 계층 재전송 방식이 무선 통신시스템의 종단간 성능에 미치는 영향에 대해서 분석되어지지 않았다. 또한 제안된 다 계층 재전송 방식간의 성능이 비교 분석되어지지 않아 사용자에게 제공되는 서비스 특성에 적합한 다 계층 재전송 방식을 선택하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 다 계층 재전송 방식이 사용되는 무선 통신시스템의 종단간 성능 분석 모델을 제시한다. 또한 분석된 모델을 이용하여 다 계층 재전송 방식에 따른 무선 통신시스템의 종단간 성능을 비교 분석함으로써 서비스 특성에 적합한 다 계층 재전송 방식이 사용될 수 있도록 한다.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 무선 통신시스템의 종단간 성능 분석을 위해 그림 1과 같은 시스템 계층 모델을 사용한다. 계층별 재전송 방식은 PHY 계층에서 HARQ가 수행되고, MAC 계층에서는 ARQ가 수행되며, TCP/IP 계층에서는 TCP Reno가 사용된다. 또한 패킷 전송 시 사용되는 무선채널 모델로는 성능 분석

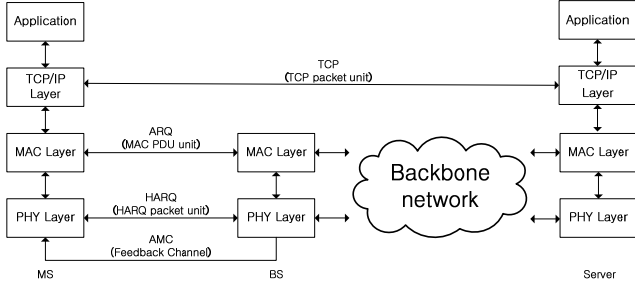


그림 1. 시스템 계층 구조

의 용이함을 위해 Rayleigh 채널 모델을 사용하며, 다음 수식과 같이 SNR의 분포 확률을 구할 수 있다.

$$p_r(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad (1)$$

여기서 γ 는 수신 측에서 측정된 SNR이며, $\bar{\gamma}$ 는 평균 SNR이다. 또한 성능 분석 시 다음과 같이 몇 가지 가정을 고려한다. 첫째, 수신 측에서 측정된 채널 상태 정보는 완벽하며, 송신 측으로 오류와 지연 없이 피드백 채널을 통해 전달된다. 둘째, 오류 검출은 순환중복검사에 의해 완벽하게 수행된다.

3. 성능 분석 모델

본 절에서는 무선 통신시스템에서 사용되는 다계층 재전송 방식에 따른 TCP/IP 계층에서의 처리율을 구해보도록 한다.

본 논문에서는 TCP/IP 계층에서 재전송 방식으로 TCP Reno를 사용하는 것을 가정하였으며, 이때의 처리율은 다음 수식과 같이 구할 수 있다[3].

$$S \approx \frac{1}{RTT \sqrt{\frac{2bp}{3}} + T_0 \min\left(1, 3\sqrt{\frac{3bp}{8}}\right) p(1+32p^2)} \quad (2)$$

이때, S 는 TCP/IP 계층에서의 처리율이며, b 는 중복송인을 사용할 때 한번의 ACK 전송으로 인해 승인되는 패킷의 수이며, p 는 TCP 패킷 오류율이고, T_0 는 패킷의 타임 아웃 시간을 나타낸다. 위 수식에서 TCP 패킷의 오류율 p 는 다음 수식과 같이 구할 수 있다.

$$p = 1 - (1 - P_{drop})^{N_f} \quad (3)$$

여기서 N_f 는 하나의 TCP 패킷이 조각화 되는 MAC 프레임 수이며, P_{drop} 은 하나의 MAC 프레임이 HARQ 또는 ARQ 동작 이후에도 오류로부터 복구되지 못할 확률이며 재전송 방식에 따라 PHY 또는 MAC 계층에서의 평균 PER을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{drop\ HARQ} &= P^{(N_i)} \\ P_{drop\ ARQ} &= PER^{N_i} \\ P_{drop\ Comb} &= (P^{(N_i)})^{N_i} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $P^{(N_i)}$ 는 HARQ를 사용하는 경우 패킷이 N_i 번째 전송 이후에도 오류로부터 복구하지 못할 확률이며, PER 은 MAC 프레임의 PER, $P_{drop\ Comb}$ 는 HARQ와 ARQ가 함께 사용될 경우의 TCP 패킷 오류율을 나타낸다. 위 수식에서 각 다계층 재전송 방식별 평균 PER은 다음과 같은 과정에 의해 각각 구할 수 있다.

다계층 재전송 방식에서 HARQ Type II가 사용될 경우 재전송된 패킷의 오류 복구를 위해 초기부터 전송된 패킷과 결합한다. 따라서 HARQ Type II에서 i 번째 전송 이후 패킷의 평균 PER은 결합확률을 이용하여 다음 수식과 같이 구할 수 있다[1].

$$\begin{aligned} \overline{PER} &= \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N \dots \sum_{N_i=1}^N \int_{\gamma_{n_1}^{(1)}}^{\gamma_{n_1+1}^{(1)}} \int_{\gamma_{n_2}^{(2)}}^{\gamma_{n_2+1}^{(2)}} \dots \int_{\gamma_{n_{N_i}}^{(N_i)}}^{\gamma_{n_{N_i}+1}^{(N_i)}} \\ &P\left\{F_{n_1}^{(1)}(\gamma^{(1)}), \dots, F_{n_1, \dots, n_{N_i}}^{(N_i)}(\gamma^{(1)}, \dots, \gamma^{(N_i)})\right\} \cdot \\ &p(\gamma^{(1)}) \dots p(\gamma^{(N_i)}) \cdot d\gamma^{(1)} \dots d\gamma^{(N_i)} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 n_1, \dots, n_i 는 각 전송에서 사용된 MCS 레벨이며, N_i 는 최대전송횟수, N 은 MCS 레벨의 수를 나타낸다. 또한 $P\left\{F_{n_1, \dots, n_i}^{(i)}(\gamma^{(1)}, \dots, \gamma^{(i)})\right\}$ 는 i 번째 재전송 이후 결합된 패킷의 PER이다.

하지만 수식 (2)에서 결합확률을 계산하는 것은 어려우므로 최악의 경우를 포함하는 상한 경계 값으로 대체한다[4].

$$\begin{aligned} &P\left\{F_{n_1, \dots, n_{N_i}}^{(N_i)}(\gamma^{(1)}, \dots, \gamma^{(N_i)})\right\} \\ &\approx 1 - \left\{1 - P_u^{(N_i)}[\gamma^{(1)}, \dots, \gamma^{(N_i)}]\right\}^L \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &P_u^{(N_i)}[\gamma^{(1)}, \dots, \gamma^{(N_i)}] \\ &\approx a_{d_f}^{(N_i)} \cdot 2^{d_f} \left(BER_{n_1, \dots, n_{N_i}}^{(N_i)}(\gamma^{(1)}, \dots, \gamma^{(N_i)})\right)^{d_f^{(N_i)}/2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$BER_{n_1, \dots, n_{N_i}}^{(N_i)}(\gamma^{(1)}, \dots, \gamma^{(N_i)}) \approx \frac{\sum_{j=1}^{N_i} L_j \cdot BER_{n_j}^{(j)}(\gamma^{(j)})}{\sum_{j=1}^{N_i} L_j} \quad (5)$$

이때, $BER_{n_1, \dots, n_{N_i}}^{(N_i)}(\gamma^{(1)}, \dots, \gamma^{(N_i)})$ 은 N_i 번 전송이 완료된 후의 BER이며, 이는 N_i 번의 전송에서 전송된 전체 비트 중 오류가 발생된 비트의 비율로 근사할 수 있다.

다계층 재전송 방식에서 ARQ가 사용될 경우 재전송된 패킷의 PER은 초기에 전송된 패킷과 독립적이다. 따라서 각 전송 시도에서 MCS 레벨 n 이 선택될 확률을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다[2].

$$\begin{aligned} \Pr(n) &= \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} p_r(\gamma) d\gamma \\ &= \exp\left(-\frac{\gamma_n}{\bar{\gamma}}\right) - \exp\left(-\frac{\gamma_{n+1}}{\bar{\gamma}}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\Pr(n)$ 은 MCS 레벨 n 이 선택될 확률이며, $p_r(\gamma)$ 는 SNR의 Rayleigh 채널 모델이다. 위 수식

(6)을 이용하여 MCS 레벨 n 을 통해 전송된 패킷의 평균 PER 을 구할 수 있다[2].

$$\begin{aligned} \overline{PER}_n &= \frac{1}{\Pr(n)} \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} PER_n(\gamma) \cdot p_r(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{1}{\Pr(n)} \cdot \frac{a_n}{\bar{\gamma}} \cdot \frac{1}{c_n} (\exp(-c_n \gamma_n) - \exp(-c_n \gamma_{n+1})) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{이때, } c_n = \frac{1}{\bar{\gamma}} + g_n$$

수식 (6)과 (7)을 이용하여 총 전송된 패킷의 수와 오류가 발생한 패킷의 수의 비율로 평균 PER 을 구할 수 있다[2].

$$\overline{PER} = \frac{\sum_{n=1}^N R_n \Pr(n) \overline{PER}_n}{\sum_{n=1}^N R_n \Pr(n)} \quad (8)$$

마지막으로 다 계층 재전송 방식에서 HARQ 와 ARQ 가 함께 사용될 경우 MAC 계층에서의 평균 PER 은 HARQ 에 의해 패킷이 N_i 번 전송된 후에도 오류로부터 복구되지 못할 확률과 같으며, 수식 (9) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$PER_{MAC} = P^{(N_i)} \quad (9)$$

4. 성능 분석 결과

성능 평가를 위해 구현된 시스템은 2 절에서 소개된 모델을 사용하였다. 또한 HARQ 분석을 위한 파라미터 값은 $a_d^{(2)}=2$, $a_d^{(3)}=3$, $d_f^{(2)}=7$, $d_f^{(3)}=12$ 를 사용하였다. 또한 성능평가의 용이함을 위해 다음과 같은 몇 가지 상황을 가정한다. 첫째, 전체 무선 채널 자원 중 90%는 다른 트래픽에 의해 점유되었다. 둘째, 자원 할당은 PHY 또는 MAC 패킷 단위로 한다. 셋째, IP 백본망에서 100msec 의 전송 지연이 발생한다.

그림 2 는 TCP/IP 계층의 처리율을 나타낸 것이다. HARQ 와 ARQ 를 함께 사용하는 경우의 처리율은 HARQ 만을 사용하는 경우의 처리율과 유사하게 나타났다. 이는 MAC 계층에서 패킷의 평균전송횟수가 2 이하로 ARQ 가 거의 동작하지 않기 때문이다. 또한 ARQ 를 사용하는 경우 처리율이 가장 낮게

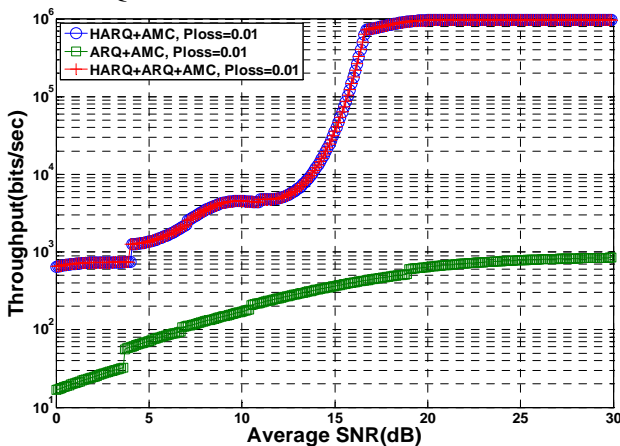


그림 2. TCP/IP 계층 처리율

나타나는 것을 알 수 있다. 이 이유는 HARQ 를 사용할 경우 평균 PER 측면에서 결합이득이 존재하며, PHY 계층에서 동작하는 HARQ 가 MAC 계층에서 동작하는 ARQ 에 비해 평균 전송지연시간이 작기 때문이다.

위의 결과를 통해 전송지연, 전송속도에 민감한 서비스는 TCP/IP 계층의 처리율이 높은 HARQ 를 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다. 또한 HARQ 와 ARQ 를 함께 사용할 경우 HARQ 만을 사용하는 경우와 비교하여 처리율 측면에서 이득이 거의 없는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 무선채널에서 전송 효율성과 신뢰성을 향상시키기 위해 제안된 다 계층 재전송 방식을 사용하는 무선 통신시스템의 종단간 성능에 대해 수학적 분석 모델을 제시하였다.

성능 분석 결과, 다 계층 재전송 방식 중 HARQ 를 사용하는 경우 TCP/IP 계층의 처리율이 가장 높게 나타났다.

본 논문에서는 성능 분석의 용이함을 위해 몇 가지 가정을 하여 분석된 결과와 실제 환경에서의 무선 통신시스템 성능과 다를 수 있다. 따라서 향후에는 피드백 채널을 통한 CSI 정보 전송 시 발생하는 지연 및 ACK/NACK 오류 확률 등의 내용을 추가함으로써 실제 환경과 더욱 유사해지도록 연구 범위를 확대할 수 있을 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(NIPA-2010-(C1090-1021-0011))과 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0066642).

6. 참고 문헌

- [1] D. Wu and S. Ci, "Cross-Layer Combination of Hybrid ARQ with Adaptive Modulation and Coding for QoS Provisioning in Wireless Data Networks," in *IEEE/ACM QShine' 06*, Waterloo, ON, Canada, vol. 191, pp.1-9, Aug. 2006.
- [2] Q. Liu, S. Zhou, and G. Giannakis, "Cross-Layer Combining of Adaptive Modulation and Coding with Truncated ARQ over Wireless Links," *IEEE Trans. Commun.*, vol.3, pp.1746-1755, Sept. 2004.
- [3] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation," in proceeding of *ACM SIGCOMM 1998*.
- [4] S. Kallel and D. Haccoun, "Generalized Type II Hybrid ARQ Scheme Using Punctured Convolutional Coding," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, pp.1938-1946, Nov. 1990.