

채널 에러가 존재하는 무선랜 환경에서의 성능 분석 연구

박현구^o 김중권

서울대학교 컴퓨터 공학과

{hgpark^o, ckim}@popeye.snu.ac.kr

Performance Analysis of Wireless Lan with Channel Error

Hyungu Park^o Chongkwon Kim

Seoul National University

요 약

IEEE 802.11 이 표준화 되면서 성능 분석에 대한 연구가 많이 활발히 진행되고 있다. 가장 대표적인 802.11 DCF 분석모델로 비양키 모델이 있는데, 이는 채널에 에러가 없는 상황을 가정하여 분석하고 있다. 비양키 모델에서는 모든 노드는 전송 시도를 했을 때 시간에 독립적인 확률 p 의 전송 실패율을 갖게 된다는 디커플링 가정을 기반으로 분석하였으며, 대부분의 확장논문들 역시 이 가정을 바탕으로 하고 있다. 본 논문에서는 디커플링 가정을 사용하지 않는 방법으로 채널에러가 존재하는 IEEE 802.11 DCF의 성능을 분석하였으며 분석 결과를 NS2 를 이용한 시뮬레이션과의 비교를 통해 분석의 정확성을 검증하였다.

1. 서 론

IEEE 802.11 표준화[1]가 진행되면서 무선랜 기술과 각 계층에서의 프로토콜 성능에 대한 연구가 활발히 진행되기 시작했다. 최근에는 이와 같은 기술들에 힘입어 많은 통신 기업의 무선랜 망 서비스 사업이 시작되고 있으며, 대학교, 도서관, 사무실 등에 수많은 무선 AP 들을 설치하여 데이터 서비스를 제공하는 Hot-spot 서비스를 시행하고 있다.

무선랜 기술이 널리 이용되면서 무선랜 성능 향상에 대한 연구가 많이 진행되었는데, 그중 하나가 사용가능한 전송 속도들 중 현재 채널 상황에 맞는 최적의 속도를 결정하는 link adaptation 기법 연구이다. IEEE 802.11 을 사용하는 노드는 다른 변조 및 채널 부호화 기법을 이용하여 채널의 상태에 따라 다른 전송 속도를 사용할 수가 있다. 802.11b 에서는 1, 2, 5.5, 11 Mbps를 지원하며 802.11a 에서는 6Mbps에서 54Mbps 사이에 8개의 전송속도를 지원한다. 각 전송속도를 사용 하였을 때 동일한 Signal to Interference and Noise Ratio (SINR) 에 대해서 패킷 전송 성공률이 차이가 나게 된다. 즉 채널 에러가 존재한다고 생각할 수 있는 것이다.

기존에 802.11 DCF의 성능을 분석한 논문[2][3][4]들은 모두 채널에 에러가 없음을 가정하고 분석해 나가고 있다. 그밖에 채널 에러를 고려하여 802.11 DCF 의

성능을 분석하고자 하는 연구[5][6][7]가 많이 진행이 되었는데 이들은 802.11 표준을 정확하게 고려하지 않았고, 많은 가정들로 인해 정밀한 처리율을 계산하지 못하는 문제점들이 있었다. 따라서 본 논문에서는 고정된 비트 에러율에 의한 패킷에러가 있을 때의 IEEE 802.11 DCF 성능을 정밀하게 분석하고자 한다.

기존에 선행되었던 대부분의 분석방법들의 기초가 되는 가정이 디커플링 가정으로 맨처음 Bianchi 의 논문[2]에서 처음 도입되었다. 디커플링 가정이란 시스템이 안정화된 상황에서 노드가 전송을 시도 했을 때 그것이 실패할 확률이 독립적이고 고정된 확률 p 를 갖는다는 가정이다. 이러한 가정을 통해 DCF 와 같은 경쟁기반 MAC프로토콜의 백오프 과정을 단순화시켜 분석할 수 있었다.

[3]-[7]과 같은 연구들은 비양키의 모델을 이용하여 좀 더 확장된 환경에서의 분석을 수행 했다. 그만큼 디커플링 가정은 모델링을 단순화 시킬 수 있는 강력한 가정이라고 할 수 있다.

본 논문에서의 분석방법은 기존의 연구들이 디커플링 가정을 기본으로 해왔던 것과는 달리, 전체적인 시스템을 바탕으로 마코비안 모델을 설계한 후 이를 정밀하게 분석하는 방법을 이용한다. 이 방법은 [8]에서 제안된 방법으로 상당히 정교하게 DCF 와 EDCA 의 성능을 분석하고 있다. 이 방법의 핵심은 각 백오프 stage 에 있는 노드의 개수를 하나의 상태로 정의하여 각 상태들 사이에 마코프 체인을 형성하는 것이다. 보통 마코프

체인이 설계되면 그것의 stationary distribution 을 구하여 각 상태에 있을 확률을 구하여 분석하게 된다. 하지만 여기서는 시간이 지남에 따라 시스템 상태가 “특정 상태”로 수렴하게 된다는 점에 착안하여, 최종적으로 수렴하게 되는 “특정 상태”를 구하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 고정된 패킷 에러율이 있는 환경에서의 DCF 모델링

비트 에러에 의한 프레임 에러율 p_e 가 고정되어 있고, 모든 노드들이 고정된 전송속도를 가지고 있는 802.11 DCF 의 성능을 분석하고자 한다. 분석과정은 다음과 같다.

- 1) 프레임 에러율을 고려한 백오프 프로세스에 대해 모델링 한다.
- 2) 모델링된 백오프 프로세스에서 시간이 무한히 흘렀을 때 수렴되는 “특정 상태”를 구한다.
- 3) 시스템이 “특정 상태”에 있다고 가정하고 throughput 을 계산해 낸다.

2.1 마코프 체인을 이용한 백오프 프로세스 모델링

백오프 stage i 에 있는 노드가 선택하는 백오프 카운터값은 기하 분포로 생각할 수 있다. 즉 W_i 가 백오프 stage i 에서의 최대 Contention Window 크기라 하면, 총 W_i 번의 카운터 값을 선택을 했을 때 1부터 W_i 까지 고르게 선택이 된다는 것을 의미 한다. 따라서 평균적으로 선택되는 백오프 카운터값을 계산해보면

$$\frac{\sum_{k=1}^{W_i} k}{W_i} = \frac{W_i+1}{2}$$

가 된다. 결국 stage i 에 있는 노드

는 $p_i = \frac{2}{W_i+1}$ 의 확률로 전송시도를 한다고 생각할 수 있다. 모든 노드들은 같은 백오프 변수를 갖는 환경을 가정하고 있으며 총 0부터 M 까지 총 $M+1$ 개의 백오프 stage 가 있다.

이제 시간 t 에 대한 이산 시간 모델을 정의 하고자 한다. 채널의 상태를 idle 한 상태, 전송 상태, 충돌 상태로 나누었을 때 여기서의 시간 t 는 각 상태의 시작 순서를 의미한다. 즉 $t+1$ 은 다음 상태가 시작되는 시간을 의미한다. 시간 t 에서의 시스템 상태를 벡터 $X(t) = (X_0(t), X_1(t), \dots, X_M(t))$ 와 같이 표현 하도록 하겠다. 각 원소 $X_i(t)$ 는 시간이 t 일때 전체 시스템에 있는 노드중 백오프 stage i 에 있는 노드의 개수를 의

미한다. 전체 노드의 개수가 n 이라 하면 시간 t 가 흐름에 따라 $X(t)$ 는 각 원소의 합이 n 인 상태 공간에서 마코프 체인이 형성됨을 알 수 있다. [8] 에 의하면 이러한 마코프 체인 $X(t)$ 는 n 이 커질 경우 “특정 상태”로 근접해 감을 보였다. 따라서 우리는 이 마코프 체인의 stationary distribution 을 구하는 것이 아니고 최종적으로 수렴해 가는 “특정 상태”를 찾을 것이다.

3.2 “특정 상태” 구하기

“특정 상태”는 시간 t 가 지나도 상태가 변하지 않는다는 점을 이용하여 구할 수 있다. 시간 t 가 1증가 했을 때 예상되는 변화량을 다음과 같이 정의하였다.

$$f(x) = E\{X(t+1) - X(t) | X(t) = x\}$$

이는 현재 상태가 x 일때 다음 시간에서의 상태와 현재 상태 사이의 예상되는 변화를 나타내는 함수이다. 이제 $f(x) = 0$ 이 되는 x 를 구하면 되는 것이다. 이 함수 역시 $f_0(x), f_1(x), \dots, f_M(x)$ 로 나누어 각 백오프 stage들에서의 변화량으로 생각할 수 있는데, $f_i(x)$ 를 $i=0 \cdot 0 < i < M \cdot i=M$ 일 때의 3가지 경우로 분류하여 구하도록 하겠다.

첫 번째로 $i=0$ 일때, 즉 백오프 stage 0에서의 예상 변화량을 살펴보도록 하겠다. 앞에서 정의했듯이 p_i 가 백오프 stage i 에서의 전송 시도 확률일 때, 시스템이 상태 x 에 있을 때 아무도 전송을 하지 않을 Idle 할 확률 $K(x) = \prod_{i=0}^M (1-p_i)^{x_i}$ 이 된다. 즉 아무도 전송시도를 하지 않을 확률이 되겠다.

백오프 stage 0에서 노드의 수 변화를 살펴보면, 증가할 때와 감소 할 때로 나누어 생각해볼 수 있다. 노드 수가 증가하는 경우는 각각의 백오프 stage에서 성공적으로 전송에 성공을 했을 때 이다. 반면에 감소하는 경우는 stage 0 에 있는 노드들 중 다른 노드와 충돌이 났거나 혼자 전송시도를 했지만 채널 에러에 의해 전송이 실패 했을 경우이다.

전자와 같은 경우는 stage 1에서 M 사이에 있는 하나의 노드를 제외한 나머지 모든 노드들은 전송시도를 하지 않고 오로지 하나의 노드만 전송 시도를 함과 동시에 에러를 겪지 않을 확률 구하면 되는데, stage i 에 있는 하나의 노드를 제외한 다른 모든 노드들이 전송할 확률은 $\frac{K(x)}{1-p_i}$ 이고 여기에 p_i 를 곱하면 노드 하나가 전송을 시도할 확률이 된다. 여기에 에러를 겪지 않을 확률 $(1-p_e)$ 를 곱하면 된다. 그런데 이러한 노

드가 stage i 에 x_i 개만큼 있으므로 x_i 를 곱한후 모든 stage 에 대해 더하면, 각 stage에서 발생하는 노드들의 예상 성공 노드 수인

$$\sum_{i=1}^M x_i p_i \frac{\lambda(x)}{1-p_i} (1-p_e) \quad (1)$$

만큼 백오프 stage 0 에서의 노드 수 증가가 예상된다.

노드수가 감소되는 상황을 살펴보면, stage 0에 있는 노드들이 전송시도를 했을 때 다른 노드들로부터 하나 이상의 전송 시도가 생겨 충돌이 날 확률은 $p_0(1-\frac{\lambda(x)}{1-p_0})$ 가 되고 나 혼자 전송시도를 했지만 예

러가 날 확률은 $p_0 p_e \frac{\lambda(x)}{1-p_0}$ 가 된다. 두 사건은 독립적으로 일어나기 때문에 각 노드마다 두 사건중 하나가 일어날 확률은 두 확률의 합이 되며 여기에 stage 0 에 있는 노드의 개수 x_0 를 곱하면 stage 0 에서의 예상 실패 노드수인

$$x_0(p_0(1-\frac{\lambda(x)}{1-p_0}) + p_0 p_e \frac{\lambda(x)}{1-p_0}) \quad (2)$$

만큼의 노드 수 감소가 예상된다. (1)에서 (2)를 뺀 후 정리하면 stage 0 에서의 예상 변화량 $f_0(x)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_0(x) = \sum_{i=0}^M x_i p_i \frac{\lambda(x)}{1-p_i} (1-p_e) - x_0 p_0 \quad (3)$$

이번엔 i 가 1에서 $M-1$ 사이일 때의 상태간 변화를 살펴보고자 하겠다. stage i 에서 수가 증가되는 경우는 stage $i-1$ 에서 전송시도를 한 노드가 다른 노드와 충돌할 때 또는 stage $i-1$ 에서 혼자 전송 시도를 하였으나 에러가 나서 전송이 실패 할 때이다. stage $i-1$ 에서 충돌을 겪을 확률은 $p_{i-1}(1-\frac{\lambda(x)}{1-p_{i-1}})$ 이고 혼자 시도를

하였으나 에러를 겪을 확률은 $p_{i-1} \frac{\lambda(x)}{1-p_{i-1}} p_e$ 이다. 따라서 $i-1$ stage에 노드가 x_{i-1} 있으므로 이를 곱해서 더하면 stage i 에서의 예상 증가수

$$x_{i-1} p_{i-1} (1-\frac{\lambda(x)}{1-p_{i-1}}) + x_{i-1} p_{i-1} \frac{\lambda(x)}{1-p_{i-1}} p_e \quad (4)$$

를 구해낼 수 있다.

반면 예상되는 감소량은 간단하게 각 노드마다 전송 시도가 일어날 확률 p_i 와 같게 된다. 왜냐하면 stage i 에 이는 노드는 전송시도를 했을 경우 반드시 충돌 또는 채널 에러에 의해 실패하거나 전송 성공을 하게 되는데 모든 경우에서 stage i 를 벗어나기 때문에 전송시도 확률 자체가 한 노드의 감소 확률을 나타내는 셈이

다. 즉 예상되는 평균 노드 감소수는

$$x_i p_i \quad (5)$$

가 되고 (4)에서 (5)를 빼어 예상되는 노드 변화량을 정리하면

$$f_i(x) = x_{i-1} p_{i-1} (1-\frac{\lambda(x)}{1-p_{i-1}}) + x_{i-1} p_{i-1} \frac{\lambda(x)}{1-p_{i-1}} p_e - x_i p_i \quad (6)$$

가 된다.

마지막으로 stage M 에서의 변화량을 구하도록 하겠다. 우선 증가되는 경우는 앞에서 전개했던 stage i 에서와 같이 $M-1$ stage에서의 노드와 다른 노드들이 동시에 전송 시도를 함으로써 발생하는 충돌에 의해 전송 실패하는 노드 수 $x_{M-1} p_{M-1} (1-\frac{\lambda(x)}{1-p_{M-1}})$ 과 혼자 전송시도를 하였으나 채널 에러에 의해 실패하는 노드 수 $x_{M-1} p_{M-1} \frac{\lambda(x)}{1-p_{M-1}} p_e$ 를 더하면 stage M 에서 증가하는 노드수를 계산할 수 있다.

stage M 에서 노드 수가 감소하는 경우는 stage 0에서 감소하는 경우와는 달리 실패한 노드는 여전히 stage M 에 남아 있게되고, 전송에 성공한 노드만 stage 0으로 옮겨가므로 성공적으로 전송이 일어나는 경우만을 고려해야 한다. 이는 혼자 전송시도가 있으면서 에러를 겪지 않을 확률이 $p_M \frac{\lambda(x)}{1-p_M} (1-p_e)$ 이기 때문에 여기에 x_M 를 곱하면 예상 감소 노드수를 구할 수 있다. 이제 증가분에서 감소분을 빼면 stage M 에서의 변화량 $f_M(x)$ 를 다음과 같이 구하였다.

$$f_M(x) = x_{M-1} p_{M-1} (1-\frac{\lambda(x)}{1-p_{M-1}}) + x_{M-1} p_{M-1} \frac{\lambda(x)}{1-p_{M-1}} p_e - x_M p_M \frac{\lambda(x)}{1-p_M} (1-p_e) \quad (7)$$

이제 앞에서 구한 변화량 함수 $f(x)$ 는 (3),(6),(7)과 같으며 $f(x)=0$ 이 되는 x^* 가 바로 찾고자 했던 "특정 상태"가 되는 것이다.

3.3 처리율 계산

이제 시스템이 앞에서 구한 "특정 상태"에 있다고 가정하여 채널 에러가 있을 때 IEEE 802.11 DCF의 처리율을 계산할 수 있다. 전체적인 관점에서 봤을 때 채널은 Idle 상태, 충돌이 난 상태, 전송중인 상태 그리고 채널 에러를 겪은 상태로 나눌 수 있는데 이제 각 상태가 나올 확률과 각 상태의 지속시간을 계산하면 전체

처리율을 계산 할 수 있다.

백오프 stage i 에 있는 하나의 노드는 그 노드를 제외한 모든 노드가 전송하지 않을 확률 $\frac{I}{1-p_i}$ 일때 그 노드 혼자 전송 시도할 확률 p_i 로 전송 시도를 하게 된다. 채널 관점에서 봤을 때 모든 백오프 stage 에 있는 노드들에 대해 혼자서만 전송시도를 할 확률을 고려해야 하고, 채널이 idle 하지 않았을 때에 대한 조건부 확률로 구하면 에러를 겪지 않아 성공적인 채널 전송상태가 발생할 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_s = \frac{\sum_{i=0}^M x p_i \frac{I}{1-p_i}}{1-I} (1-P_e)(1-l)$$

다음은 채널 에러가 일어난 상태가 발생할 확률이다. 위에서와 마찬가지로 idle 하지 않으며 성공적인 전송 시도를 하였으나 에러를 겪을 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_e = \frac{\sum_{i=0}^M x p_i \frac{I}{1-p_i}}{1-I} p_e(1-l)$$

마지막으로 충돌이 일어난 상태가 발생할 확률은 혼자 전송 시도할 확률을 1에서 뺀 후 idle 하지 않을 확률을 곱하여 구할 수 있다. 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_c = (1 - \frac{\sum_{i=0}^M x p_i \frac{I}{1-p_i}}{1-I}) (1-l)$$

이제 각각의 상태 가 지속되는 시간을 구하면 되는데 IEEE 802.11 DCF 표준에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_s = T_{rts} + T_{cts} + T_{header} + T_{payload} + T_{ack} + 3T_{sifs} + 4T_{propagation} + T_{difs} + T_{idle}$$

$$T_c = T_{rts} + T_{sifs} + T_{cts} + T_{difs} + T_{idle}$$

$$T_e = T_s$$

위에서 사용된 값은 rts, cts, header, payload, ack, sifs, propagation, idle일 때의 전송시간 또는 표준에 정의된 시간간격을 의미한다. 이를 이용하여 다음과 같은 식으로 전체 처리율을 구할 수 있다.

$$T = \frac{P_s T_s + P_e T_e + P_c T_c + I_0}{P_s T_s + P_e T_e + P_c T_c + I_0}$$

3. 성능 검증

앞에서 모델링한 방법에 대한 검증을 위해 NS-2를 이용한 시뮬레이션과 비교해 보았다. 시뮬레이션 환경

은 5개의 백오프 stage 가 있고 $W_0=128$ 일 때 패킷 에러율이 0.05 , 0.2일 때 비교해 보았다.

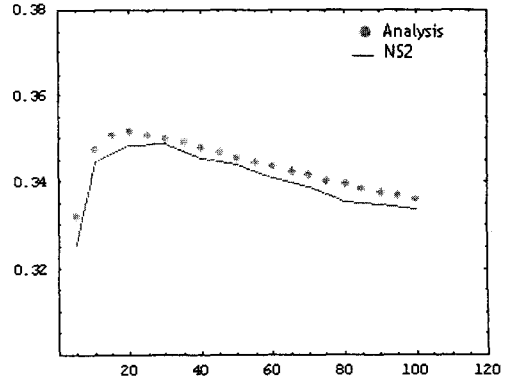


그림 1. 패킷 에러 0.05 일때 정규화된 처리율 (x 축은 노드의 개수)

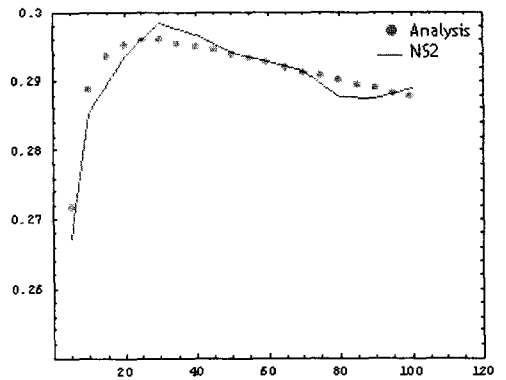


그림 2. 패킷 에러 0.2 일때 정규화된 처리율 (x 축은 노드의 개수)

그림1 과 그림 2에서 좀더 정확한 비교를 위해 y 축의 범위를 확대한 것이기 때문에, 분석 모델과 NS2 시뮬레이션과의 차이는 오차율이 매우 작음을 알 수 있다. 즉 제안한 모델이 실제로 에러가 있는 IEEE 802.11 DCF 의 성능을 잘 분석함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

우리는 채널 에러가 존재하는 환경에서 고정된 프레임 에러율을 갖을때 IEEE 802.11 DCF 의 성능을 분석해 보았다. 비양키 모델에서 의 디커플링 가정을 사용하지 않는 새로운 모델을 설계하여 분석에 사용하였으며 시뮬레이션과 비교해본 결과 거의 정확하게 처리율

을 계산해 낼 수 있음을 확인하였다.

5. 참고 문헌

[1] IEEE 802.11 WG. International standard for information technology-local and metropolitan area networks, part 11:wireless LAN MAC and PHY specifications, 1999

[2] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2000; 18(3): 535-548

[3] Vishnevsky V, Lyakhov A. IEEE 802.11 LANs:saturation throughput analysis with seizing effect consideration. Journal of Clustre Computing 2002; 5: 133-144.

[4] Wu H,Peng Y, Long K , Cheng S, Ma J. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement. Proceedings of IEEE INFOCOM 2002; 2: 599-607

[5] Chatizimisios P, Boucouvalas AC, Vitsas V. Performance analysis of IEEE 802.11 DCF in presence of transmission errors. Proceedings of IEEE ICC 2004; 7: 3854-3858

[6] Velkov ZH, Spasenovski B. Saturation throughput -delay analysis of IEEE 802.11 DCF in fading channel. Proceedings of IEEE ICC 2003;1:121-126

[7] Yin J,Wang X, Agrawal DP. Optimal packet size in error prone channel for IEEE 802.11 distributed coordination function. Proceeding of IEEE WCNC 2004; 3: 1654-1659

[8] G. Sharma, A.J. Ganesh, and P.B. Key, "Performance Analysis of Contention Based Medium Access Control Protocols," IEEE INFOCOM 2006.