

IEEE 802.11 DCF 알고리즘의 수학적 분석

임석구*

*백석대학교 정보통신학부

e-mail:sklim@bu.ac.kr

Analytic Study on DCF Algorithm in IEEE 802.11
WLAN

Seog-Ku Lim*

*Div. of Information and Communications, BaekSeok University

요 약

본 논문에서는 IEEE 802.11 WLAN의 MAC인 DCF의 성능을 개선하는 알고리즘을 제안하고 이를 해석적으로 분석한다. IEEE 802.11 WLAN의 MAC에서는 데이터 전송을 제어하기 위한 방법으로 DCF와 PCF를 사용하며, DCF의 경우 CSMA/CA를 기반으로 한다. DCF는 경쟁 스테이션이 적은 상황에서는 비교적 우수한 성능을 보이나 경쟁 스테이션의 수가 많은 경우 처리율, 지연 관점에서 성능이 저하되는 문제점이 있다. 본 논문에서는 패킷 전송 후 충돌이 발생하면 윈도우 값을 최대 CW로 증가시키고 연속적으로 c 번 패킷 전송에 성공하면 CW를 감소함으로써 패킷 충돌 확률을 낮추는 알고리즘을 제안하고 이를 수학적으로 분석한다. 제안하는 알고리즘의 효율성을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하여 그 타당성을 제시하였다.

1. 서론

최근 들어 무선 랜(Wireless LAN)의 편리함과 효율성으로 인해 급격히 시장이 확대되고 있으며, 이 중에서 IEEE 802.11 표준[1]은 가장 많은 시장을 확보하고 그 영역을 지속적으로 확장해 나가고 있다.

IEEE 802.11 WLAN MAC에서는 무선채널을 액세스하기 위한 방법으로 DCF(Distributed Coordination Function)와 PCF(Point Coordination Function)를 사용한다. IEEE 802.11 WLAN의 기본적인 액세스 방법인 DCF의 경우 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)를 기반으로 하여 모든 스테이션이 동등한 관계에서 경쟁을 통해 채널을 사용하게 된다. 반면에 PCF는 액세스 포인트(AP, Access Point)와 같은 중앙제어 노드의 관리 하에 폴링(Polling) 방식을 이용하여 스테이션들이 채널을 사용할 수 있게 관리하는데, 성능 및 유연성에서 많은 문제점이 있어서 실제 대부분의 무선 랜 장비에서는 이 기능을 지원하지 않는다[2].

DCF의 기본적인 동작 방식은 다음과 같다. 먼저, 전송할 프레임이 있는 스테이션은 DIFS(Distributed Inter Frame Space)가 경과된 후 백오프 스테이지(Backoff Stage) 0에서 경쟁 윈도우(Contention

Window, CW)를 최소 경쟁 윈도우 크기(CW_{min})로 초기화하고 백오프 카운터(Backoff Counter)를 $[0, CW_{min}]$ 의 범위에서 랜덤하게 선택한다. 하나의 슬롯 시간(time slot) 동안 채널이 사용되지 않음을 감지한 스테이션은 백오프 카운터를 1씩 감소시키고 슬롯의 시작시점에 백오프 카운터가 0인 스테이션은 프레임 전송을 시작한다. 만약 충돌이 발생하게 되면, 충돌이 발생한 스테이션은 백오프 스테이지를 1씩 증가시키고 경쟁 윈도우를 두 배씩 증가시키며 백오프 카운터를 재설정 한다. 프레임 전송에 성공한 스테이션은 백오프 스테이지와 경쟁 윈도우를 초기화한다. DCF는 경쟁하는 스테이션의 수가 많을수록 충돌이 발생할 가능성이 증가하여, 이를 해결하기 위한 많은 연구들이 진행 되어왔다[3]-[8].

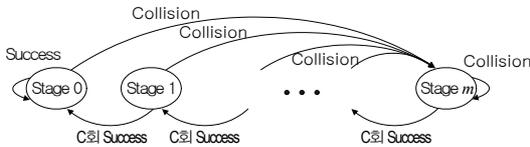
본 논문에서는 패킷을 c 회 연속적으로 성공한 경우에만 백오프 스테이지를 한 단계 낮추고 CW를 현재 값의 반으로 줄이며, 충돌이 발생한 경우에는 CW를 CW_{max} 값으로 증가시킴으로써 충돌에 대한 확률을 적게 하여 자원의 효율을 높일 수 있는 알고리즘을 제안하고 이를 해석적으로 분석하며 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 2장에서는 제안된 알고리즘에 대한 수학적 분석을 설명한다. 3장에서는 제안하는 알고리즘의 성능을 시뮬

레이션을 통해 포화수율(Saturation Throughput), 평균 패킷지연시간(Average Packet Delay) 관점에서 분석하였고 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

2. 제안하는 DCF 알고리즘

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 충돌-해결 과정을 [그림 1]에 나타내었다. 초기에 백오프 스테이지(stage 0)에서 CW 값은 최소값 CW_{min} 을 갖는다. 충돌이 발생하여 패킷전송에 실패하면 CW를 CW_{max} 값으로 증가시키고, 패킷을 c 회 연속적으로 성공한 경우에만 백오프 스테이지를 한 단계 낮추고 CW를 현재 값의 반으로 줄임으로써 충돌에 대한 확률을 적게 하여 자원의 효율을 높일 수 있는 알고리즘을 제안한다.



[그림 1] 제안하는 알고리즘의 충돌-해결 과정

CW 값의 산출은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CW_i = \begin{cases} CW_{max} & \text{if collision} \\ \max(CW_{i-1}/2, CW_{min}) & \text{if } c \text{ consecutive success} \end{cases} \quad (1)$$

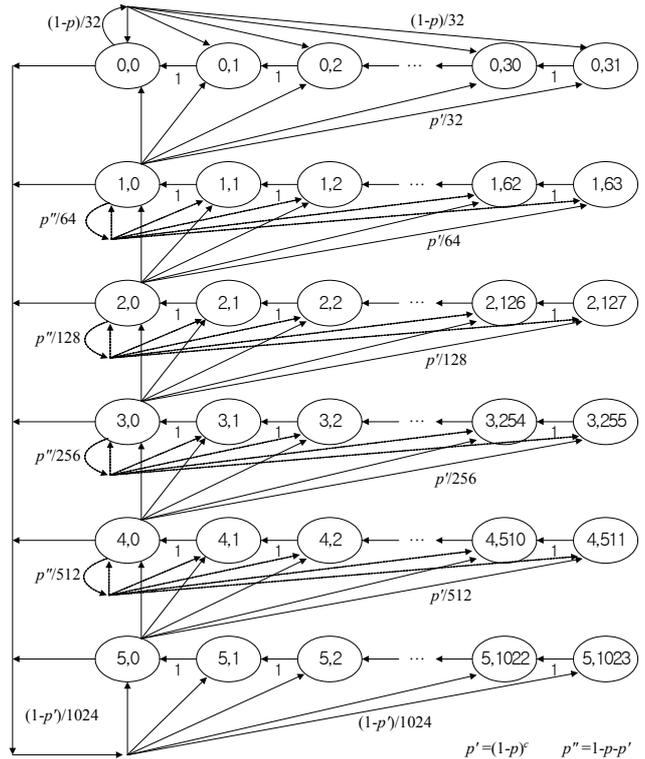
Bianchi는 2차원 마코프 체인(Markov Chain)을 이용한 DCF의 성능 평가 모델을 제안하고 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다[4][5]. 이를 이용하여 제안하는 알고리즘의 포화 상태 수율을 분석하기 위해 n 개의 단말이 존재하고 각 단말은 프레임 전송을 성공적으로 마친 시점에 전송하고자하는 새로운 프레임을 가지고 있다고 가정한다. $s(t)$ 와 $b(t)$ 를 임의의 시간 t 에서 단말의 백오프 스테이지와 백오프 카운터 값을 나타내는 랜덤 프로세스(random process)라고 하면, 제안하는 알고리즘에 대한 동작은 2차원 마르코프 체인 $\{s(t), b(t)\}$ 으로 나타낼 수 있으며, 이를 식 (2)와 같이 정의하면 정상 상태에서의 마르코프 체인은 [그림 2]와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P[s(t) = i, b(t) = j] = b_{i,j} \quad (2)$$

전송한 프레임이 충돌할 확률을 p 라 하면, 마르코프 성질을 이용하여 다음과 같이 조건부 확률을 이용하여 상태 천이 확률을 구할 수 있다.

$$\begin{cases} P[i, k | i, k+1] = 1 & k \in (0, W_i - 2) \quad i \in (0, m) \\ P[0, k | 0, 0] = (1-p)/W_0 & k \in (0, W_0 - 1) \\ P[m, k | i, 0] = p/W_m & k \in (0, W_m - 1) \quad i \in (0, m) \\ P[i-1, k | i, 0] = p'/W_{i-1} & k \in (0, W_{i-1} - 1) \quad i \in (1, m) \\ P[i, k | i, 0] = (1-p-p')/W_i & k \in (0, W_{i-1} - 1) \quad i \in (1, m-1) \end{cases} \quad (3)$$

$p' = (1-p)^c$: c 번 연속해서 전송에 성공할 확률



[그림 2] 제안 알고리즘의 마르코프 체인 모델

마르코프 체인의 규칙성에 따라 각 $k \in (0, W_i - 1)$ 에 대해서 $b_{i,k}$ 는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot \begin{cases} (1-p)b_{0,0} + p'b_{i+1,0} & i = 0 \\ (1-p-p')b_{i,0} + p'b_{i+1,0} & 0 < i < m \\ p \sum_{j=0}^m b_{j,0} & i = m \end{cases} \quad (4)$$

따라서 식 (4)에 의해서 $b_{i,k}$ 의 모든 값들은 $b_{0,0}$ 와 조건부 충돌확률 p 의 함수로 표현된다. 마지막으로 $b_{0,0}$ 는 모든 구간에서의 확률값을 더하면 1이 된다는 조건을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} b_{i,k} = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \frac{W_i + 1}{2} \quad (5)$$

식 (5)에서 $b_{i,0}$ 는 식 (4)를 사용하여 산출할 수 있으며, W_i 는 IEEE 802.11b 표준에 의하면 DSSS인 경우 $m' = 5$ 이므로 다음과 같다.

$$W_i = \begin{cases} 2^i W_0 & i \leq m' \\ 2^{m'} W_0 & i > m' \end{cases} \quad (6)$$

단말이 프레임 전송을 시도할 확률 τ 는 $b_{i,0}(i \in [0, m])$ 에 있을 확률을 모두 더한 것이 되고 따라서 τ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = (1 + \rho)^m b_{0,0} \quad (7)$$

$$b_{0,0} = 2 \left[W + (1 + \rho)^m + 2\rho W \frac{2^m (1 + \rho)^{m-1} - 1}{1 + 2\rho} + (2^m W + 1) \left\{ (1 + \rho)^m - (1 + \rho)^{m-1} \right\} \right]^{-1}$$

하나의 전송 패킷이 충돌할 확률 p 는 나머지 $(n-1)$ 개의 스테이션 중에서 적어도 하나 이상이 전송을 시도할 확률과 같으며 다음 식과 같이 표현된다.

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)은 두 개의 미지수를 갖는 비선형 시스템이며, 수치해석적인 방법을 이용하여 해를 구할 수 있다.

P_{tr} 을 임의의 슬롯시간에 최소한 하나 이상의 단말이 패킷을 전송할 확률이라고 하면, 무선채널 상에서 n 개의 단말이 경쟁하고 있기 때문에 각 단말은 확률 τ 로 전송을 시도한다.

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (9)$$

확률 P_s 는 적어도 하나 이상의 단말이 패킷을 전송할 조건에서 성공적으로 패킷을 전송할 확률이라고 하면 다음과 같다.

$$P_s = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n} \quad (10)$$

$E[P]$ 를 평균 페이로드 크기라고 하면, 성공적으로 패킷을 전송하는데 소요되는 슬롯시간의 평균은 $P_{tr}P_sE[P]$ 로 나타낼 수 있다. 슬롯이 비어 있을 확률은 $1 - P_{tr}$, 전송에 성공할 확률은 $P_{tr}P_s$, 충돌이 발생할 확률은 $P_{tr}(1 - P_s)$ 이다. 정규화 수율 S 는 전송 성공과 충돌, 그리고 백오프 시간이 차지하는 시간과 페이로드 전송시간의 비율로 정의할 수 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \frac{P_s P_{tr} E[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr} (1 - P_s) T_c} \quad (11)$$

여기서 T_s 는 패킷을 성공적으로 전송하는 데 소요되는 평균 시간이며, T_c 는 패킷 충돌에 의해 낭비되는 평균시간을 나타낸다. σ 는 빈 슬롯시간의 길이이다.

DCF의 기본 액세스 방법과 RTS/CTS 액세스 방법의 경우 성공적으로 전송한 패킷의 평균 시간 T_s 와 충돌에 의해 소비된 평균시간 T_c 에 의해서 정규

화 수율 S 가 다르게 나타난다. 패킷의 헤더를 $H(=PHY_{hdr} + MAC_{hdr})$ 로 나타내고 δ 를 전파지연이라고 하면 기본 액세스 방법에 대한 T_s 와 T_c 값은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} T_s^{bas} &= H + E[P] + SIFS + \delta + ACK + DIFS + \delta \\ T_c^{bas} &= H + E[P^*] + DIFS + \delta \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $E[P^*]$ 는 충돌 시 가장 긴 패킷 페이로드의 평균 길이이다. 대부분의 경우 모든 패킷의 길이는 동일한 크기를 가지므로 $E[P] = E[P^*] = P$ 임을 가정한다.

3. 시뮬레이션

제안하는 알고리즘의 수학적 모델을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 포화수율 관점에서 분석하였다. 시뮬레이션은 SLAM II을 사용해서 Event-Driven 방식으로 구현하였으며[9], 시뮬레이션 수행은 seed number를 변경하면서 10회의 결과에 대한 평균값을 사용하였다.

수학적 모델의 평가와 시뮬레이션 수행에 필요한 시스템 파라미터는 DSSS(Digital Sequence Spread Spectrum)를 가정하였으며, [표 1]과 같다[7]. 시뮬레이션 환경은 각 스테이션이 항상 전송할 데이터를 가지고 있는 포화상태를 가정하였으며, 전송에러에 의한 재전송은 고려하지 않았다.

[표 1] 시스템 파라미터(802.11 DSSS)

파라미터	값
Packet payload	8184 bits
MAC overhead	272 bits
PHY header	128 bits
ACK	112bit + PHY header
RTS	160bit + PHY header
CTS	112bit + PHY header
채널속도	2 Mbps
전파지연시간	1 μ sec
Slot Time	20 μ sec
SIFS	10 μ sec
DIFS	50 μ sec
CW_{min}	32
CW_{max}	1024
ACK_Timeout, CTS_Timeout	300 μ sec
재전송 한계값	7

[그림 3]은 기본 액세스인 경우 스테이션의 수의 증가에 따른 포화수율을 802.11 DCF와 제안 알고리즘($c=1$ 인 경우)을 비교하여 나타낸 그래프이다. 제안하는 알고리즘의 성능이 802.11 DCF에 비해 포화수율이 높음을 알 수 있다. 또한 802.11 DCF인 경우 스테이션 수가 증가할수록 포화수율이 급격히 감소하지만, 제안하는 알고리즘의 경우 서서히 감소하는 것을 알 수 있다.

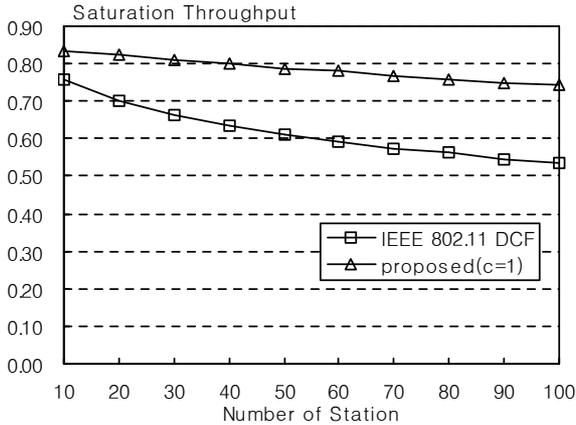
4. 결론

[그림 4]는 기본 액세스인 경우 c 의 변화에 따른 제안하는 방식의 성능을 나타내었는데, c 가 클수록 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있었다. [그림 5]는 기본 액세스인 경우 평균 패킷지연시간을 나타내었는데, 제안하는 알고리즘의 지연시간이 802.11 DCF에 비해 낮음을 알 수 있다. 이는 802.11 DCF는 잦은 충돌로 인해 지연시간이 증가되었으며, 아울러 포화수율도 감소하였음을 알 수 있다.

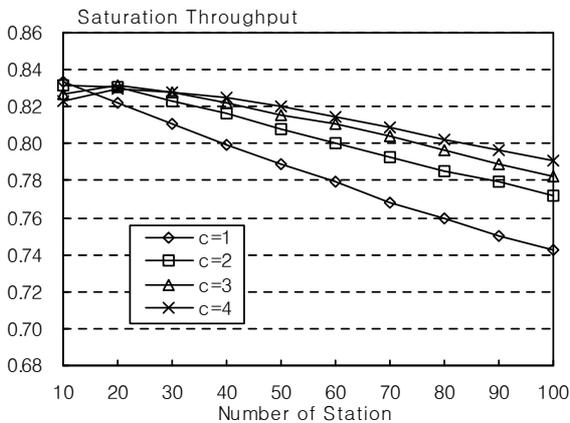
본 논문에서는 IEEE 802.11 무선랜 환경에서 기존의 DCF 매커니즘의 성능을 향상시키기 위한 새로운 알고리즘을 제안하고 이를 수학적으로 분석하였다. 제안한 알고리즘은 성공적인 패킷 전송 후에 CW 를 CW_{min} 으로 급격히 감소시키지 않고 c 번 연속적으로 패킷 전송에 성공한 경우에만 백오프 스테이지를 한 단계 낮추고 CW 를 반으로 감소시킨다. 또한 충돌이 발생하면 CW 를 CW_{max} 로 증가시킨다. 제안한 알고리즘은 스테이션이 많은 환경에서 스테이션간의 충돌 확률을 낮게 하여 채널 효율을 높일 수 있고, 평균 패킷지연시간 관점에서도 높은 성능향상을 나타내는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

참고문헌

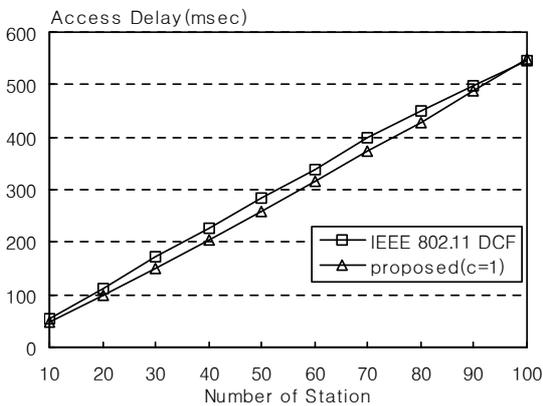
- [1] The Editors of IEEE 802.11. IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications, Nov. 1997.
- [2] Y. Xiao, "An Analysis for Differentiated Services in IEEE 802.11 and IEEE 802.11e Wireless LANs", Proc. In ICDCS 2004. pp. 32-39, 2004.
- [3] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", IEEE J. Selected Areas in Communications, Vol. 18, No. 3, pp. 535-547, 2000.
- [4] G. Bianchi, "IEEE 802.11 Saturation Throughput Analysis," IEEE Communication Letters, Vol. 2, No. 12, pp. 318-320, Dec. 1998.
- [5] Y. Xiao, J. Rosdahl, "Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11," IEEE Communication Letters. Vol. 6, No 8, pp. 355-357, Aug. 2002.
- [6] Y. Kwon, Y. Fang, and H. Latchman, "A Novel MAC Protocol with Fast Collision Resolution for Wireless LANs," Proc. IEEE INFOCOM'03, Vol. 2, pp. 853-862, April. 2003.
- [7] C. Wang and Bo Li, "A New Collision Resolution Mechanism to Enhance the Performance of IEEE 802.11 DCF", IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 53, No. 14, July 2004.
- [8] M. Y. Chung, M. S. Kim, T. J. Lee, Y. Lee, "Performance evaluation of an enhanced GDCF for IEEE 802.11," IEICE Trans. Comm., Vol. E88-B, No. 10, pp. 4125-4128, Oct. 2005.
- [9] A. Alan B. Pritsker, "Introduction to Simulation and SLAM II", John Wiley & Sons, 1986.



[그림 3] 기본 액세스에서의 포화수율의 변화



[그림 4] c 에 따른 포화수율의 변화(기본 액세스)



[그림 5] 기본 액세스에서의 평균 패킷지연시간