

IEEE 802.11 DCF에서의 게임 이론적 접근방법 소개

Survey on IEEE 802.11 DCF Game Theoretic Approaches

최병철*, 김정녀**, 류재철***

(Byeong-cheol Choi, Jung-nyeo Kim and Jae-cheol Ryu)

Abstract - The game theoretic analysis in wireless networks can be classified into the jamming game of the physical layer, the multiple access game of the medium access layer, the forwarder's dilemma and joint packet forwarding game of the network layer, and etc. In this paper, the game theoretic analysis about the multiple access game that selfish nodes exist in the IEEE 802.11 DCF(Distributed Coordination Function) wireless networks is addressed. In this wireless networks, the modeling of the CSMA/CA protocol based DCF, the utility or payoff function calculation of the game, the system optimization (using optimization theory or convex optimization), and selection of Pareto-optimality and Nash Equilibrium in game strategies are the important elements for analyzing how nodes are operated in the steady state of system. Finally, the main issues about the game theory in the wireless network are introduced.

Key Words : Wireless Networks, IEEE 802.11 DCF, Game Theory, Convex Optimization, Selfish Behavior, Security

1. 연구배경

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) 프로토콜 기반의 IEEE 802.11 DCF(Distributed Coordination Function)는 WLAN(Wireless LAN) 무선 네트워크 통신에서의 MAC 국제 표준규격이다.[1] DCF는 기본적으로 그림 1과 같은 기본(basic) 방식과 그림 2와 같은 RTS/CTS(Request To Send/Clear To Send) 방식이 있다.[5] 특히 RTS/CTS 방식은 기본 방식에서 발생했던 숨겨진 터미널 문제(hidden terminal problem)를 해결하기 위해서 나온 방식이며, 현재는 대부분 이 방식을 지원 및 사용한다.

IEEE 802.11 DCF 기반의 무선 네트워크는 일반적으로 정상적인 노드(well-behaved 또는 honest node)와 이기적 노드(selfish node 또는 cheater)들이 공존하게 된다. 정상적인 노드는 표준에 정의된 BEB(Binary Exponential Backoff) 알고리즘에 의해서 백오프 타임(backoff time)이 동작하지만, 이기적 노드는 백오프 타임을 자신이 최대의 성능(채널 사용 및 접근 확률)을 높일 수 있도록 $CW_{min} \leq CW \leq CW_{max}$, $CW_{max} = 2^n CW_{min}$ 를 고정하려고 한다.

이러한 환경에서 무선 네트워크의 전체 성능을 최대로 하기 위한 노드들이 어떻게 동작해야 하는지 분석을 할 필요가 있다. 이것을 위해서 최적화 및 게임 이론적 접근 방식을 통해서 해결하고자 하는 것이 하나의 이슈이다. 이 외에도 파워 제어(power control), 자원 할당(resource allocation), 선택적

과금(pricing) 등에 대해서도 게임 이론적 접근 방법을 도입하고 있다.

최적화 및 게임 이론적 접근 방식은 어떠한 문제에 대해서 정형화된 모델링을 하고, 모델링을 기반으로 최적화 및 게임 이론적 접근 방식으로 문제를 해결한다. 특히 시스템 안정 상태에서 시스템의 성능 함수가 유일성(uniqueness), Pareto-optimality, Nash Equilibrium을 갖는 해 또는 전략(protocol 또는 strategy)을 가지는 지에 대해서 분석하고, 이를 기반으로 NS-2(network simulator) 등을 이용해서 시뮬레이션을 통해서 실제로 어떻게 동작하는지, 그리고 어떻게 구현을 해야 하는지에 대해서도 고민할 수 있다.

본 논문의 주된 목적은 무선 네트워크에서의 최적화 및 게임 이론적 접근 방법에 대한 이해와 이를 통해 향후 다양한 모바일 무선 네트워크 분야에서 연구 결과를 산출하기 위한 기초가 되는 가이드라인을 제시하는 것이다.

본 논문은 1장의 연구배경과 2장의 최적화 및 게임 이론적 접근방법, 마지막으로 3장의 이슈정리 및 결론으로 구성되어 있다.

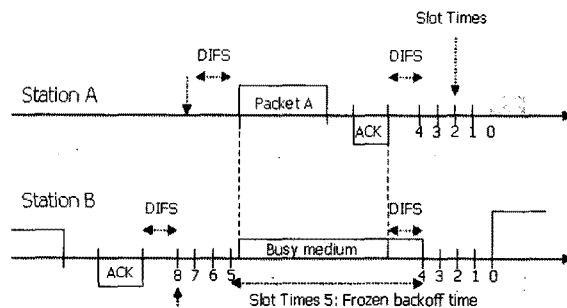


그림 2. 기본 접속 방식 (Basic Mode)

저자 소개

* 최병철 한국전자통신연구원 정보보호연구단 선임연구원

** 김정녀 한국전자통신연구원 정보보호연구단 책임연구원/팀장

*** 류재철 충남대학교 컴퓨터공학과 교수

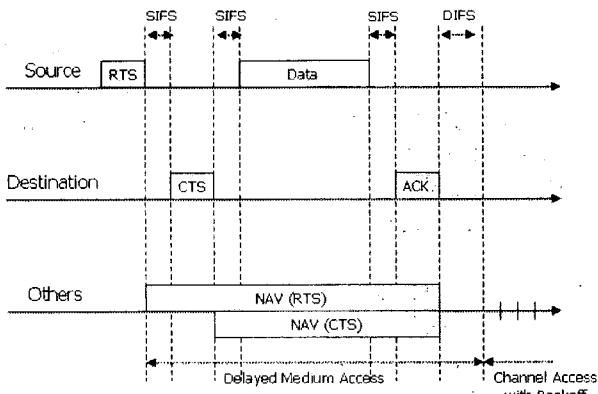


그림 3. RTS/CTS 접속 방식

2. 최적화 및 게임 이론적 접근방법

2.1 게임 이론 (Game Theory)

게임 이론적 해석에서의 기본 요소는 $P(\text{player})$, $S(\text{strategy})$, $U(\text{utility 또는 payoff})$ 이다. 즉, 플레이어가 어떠한 전략을 가지고 자신의 게임 이득을 최대화 하기 위해서 게임을 하는지에 대한 모델링 및 해석이다.[2][3]

$$G = (P, S, U) \quad (1)$$

게임은 크게 정적 게임(static game)과 동적 게임(dynamic game)으로 구분하며, 정보량에 따라서 완전정보게임(complete information game)과 불완전정보게임(incomplete information game)으로 구분할 수 있다. 이러한 게임 이론은 경제학 분야에서 중요한 역할을 하였으며, John Nash, Reinhard Selten, John Harsanyi는 게임 이론을 완성한 대가들로 1995년에 노벨 경제학상을 수상하였다.[12]

특히 수식 (1)에서 게임 시스템이 안정 상태에 도달하였을 때, 플레이어(player)에 의해 이득값(utility or payoff)이 Nash Equilibrium이 되도록 전략(strategy)을 취하고, 이 전략 중에서 게임의 전체 이득이 최대가 되도록 할 수 있는 해 또는 전략을 취할 수 있다면 그것이 Pareto-optimal 전략이 된다.

2.2 최적화 이론 (Optimization Theory and Convex Optimization)

제한조건을 가지는 어떤 함수의 최대값을 구하는 문제를 과연 어떻게 풀까? 이것에 대한 해답이 바로 최적화 이론이다. 물론 여기에서 사용되는 함수들은 미분 가능해야 한다.

단혀진 집합(convex set) S 에서 정의된 두 변수 x, y 에 대해서 수식 (2)의 문제를 푼다고 생각해 보자. 물론 최소값을 찾는 문제도 마찬가지이다.[8][9][10]

$$\max_{x,y} f(x,y) \text{ subject to } g(x,y) = c \quad (2)$$

이것을 수식 (3)과 같이 Lagrangean 함수로 다시 표현할 수 있다.

$$L(x,y) = f(x,y) - \lambda(g(x,y) - c) \quad (3)$$

수식 (3)의 Lagrangean 함수는 수식 (4)와 같이 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 1차 조건(the first-order conditions)를 만족하는 값을 가지며 이 값이 함수 $f(x,y)$ 의 unique solution (x,y,λ) 를 가진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} L(x,y) &= \frac{\partial}{\partial x} f(x,y) - \lambda \frac{\partial}{\partial x} g(x,y) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} L(x,y) &= \frac{\partial}{\partial y} f(x,y) - \lambda \frac{\partial}{\partial y} g(x,y) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 무선 네트워크에서 게임 이론적 접근방법

무선 네트워크에서의 프로토콜 레이어별 주요 게임 범주는 물리 계층의 재밍 게임(jamming game), MAC 계층의 다중 접속 게임(multiple access game), 네트워크 계층의 전달 딜레마(forward's dilemma) 및 결합 패킷 전달 게임(joint packet forwarding game)으로 구분할 수 있다. 또한, 무선 네트워크에서 게임 이론적 분석에서의 주요 고려사항으로는 이득 함수 및 비용, 선택적 과금 및 게임 방법 설계, 무한 반복 게임(infinite-horizon game), 디스카운팅 계수, 명성(reputation), 협력 및 비협력 플레이어, 정보량 등이 있다.[4]

본 논문은 무선 네트워크의 MAC 계층에서의 이기적 노드 가 있는 상황에서의 다중 접속 게임 분석에 중점을 둔다.

2.4 IEEE 802.11 DCF 성능(Throughput) 모델링

IEEE 802.11 DCF 기본 모델링은 대부분 Bianchi[5]의 2000년 IEEE J-SAC 논문을 기반으로 하고 있다. Bianchi 모델은 기본적으로 백오프 타임을 위한 CW 크기 변화를 2차원 마코프 체인(Markov chain) 모델을 이용하여 모델링하고 있다. 이것을 이용하여 랜덤하게 선택된 슬롯 타임(slot time) 내에서의 무선 전송 또는 접속을 위한 확률 τ 와 성능(throughput) S 등을 유도하였다. 이 모델링 결과는 무선 네트워크에서의 게임 이론적 접근 방법에서 기본 게임 함수를 유도해 내는데 널리 사용되고 있다.

성능 함수 S 는 수식 (5)에서와 같이 한 slot time에서의 성공적으로 전송한 데이터 패킷의 길이에 전체 상태에서의 데이터 패킷의 길이를 나눈 값(비율)이다. 따라서, 수식 (5)에서 분모에 해당하는 부분의 상태는 대기(idle), 전송 성공(success), 전송 실패 또는 충돌(collision)의 3가지 상태를 모두 포함한다.

$$S = \frac{E[\text{payload information transmitted in a slot time}]}{E[\text{length of a slot time}]} \quad (5)$$

2.5 IEEE 802.11 DCF에서 무선 액세스 게임

IEEE 802.11 DCF에서 이기적 노드의 무선 액세스 게임에 대한 연구는 Cagalj[6]의 초기 연구와 Konorski[7]의 그 이후의 연구 등이 있다. Cagalj는 IEEE 802.11 DCF에서 기본 방식에 대해서만 최적화 및 게임 이론적 접근 방법으로 문제를 풀었으며, Konorski는 좀더 일반화된 RTS/CTS 방식까지 확대하여 게임 이론적 방식으로 문제를 분석하였다. 하지만, Cagalj의 논문에서는 몇 가지 중요한 사항을 제시하고 있으며, 다른 논문의 근간이 되고 있다.

- IEEE 802.11 DCF를 게임 이론적 접근 방법 시도

(static Game & dynamic Game)

- Convex Optimization(Optimization Theory)을 이용한 해 또는 전략 찾기
- 상기의 해를 이용하여 Pareto-optimal 전략과 Nash Equilibrium 찾기 등

수식 (6)은 Cagalj가 Bianchi의 IEEE 802.11 DCF 성능 모델을 기반으로 도출한 성능(throughput) 기반의 이득 함수이다. 이를 기반으로 수식 (7)은 동적 게임 중에서 무한 반복 게임(infinite repeated game)에서의 이득 함수를 나타낸 것이며, 정적 게임에서 사용한 이득 함수에 이기적 노드 특성에 대한 패널티 함수를 뺀 값을 사용하고 있다. 본 논문에서는 실제로 패널티 함수의 실현 과정에서는 선택적 재밍(selective jamming)을 통한 채널 사용 제한이라는 방법을 사용하고 있다.

$$U_i = \frac{P_i^s \bar{L}}{P^s T^s + P^c T^c + P^j T^j} \quad (6)$$

$$J_i = U_i - P_i$$

$$\max J_i = U_i - k(\tau_i - \underline{\tau}), \forall i \in C(\text{cheaters}) \quad (7)$$

하지만, 숨겨진 터미널 문제(hidden terminal problem) 미해결, 성능(throughput) 기반의 이기적 노드 탐지 및 패널티 방법 사용, 패킷 길이를 고정함으로써 CSMA/CA 프로토콜의 기본적인 특성(즉, 시간(time)에 공평(pair)하며, 성능(throughput)에 공평하지 않음) 수렴 실패 등의 문제점은 가지고 있다. 이를 상당부분 해결한 연구 결과가 Konorski의 논문이라고 판단된다.

3. 이슈정리 및 결론

IEEE J-SAC(Journal on Selected Areas in Communications)에서는 최근 "Game Theory in Communication Systems" 분야에 대해서 논문 모집을 하였으며,[12] 특히 무선 통신(Mobile WLAN, MANET (VANET 포함) 등)에서의 보안 및 프라이버시(security & privacy) 문제도 중요한 이슈가 되고 있다. 이 분야에 대해서는 스위스 연방공과대학 (EPFL)의 J-P. Hubaux 교수가 관련 연구 결과물을 많이 발표하고 있다.[13]

본 논문에서 살펴본 무선 네트워크 통신 또는 무선 통신에서의 게임 이론적 접근 방법은 기존의 유선 네트워크에서 사용되었던 다양한 이론들로 무선 이동 네트워크에 대한 분석의 한계점을 극복하기 위해서 등장하게 되었다. 특히 최적화 및 게임 이론적 접근 방법이 모바일 무선 통신에서 이기적 특성을 지닌 공격자들을 포함한 네트워크의 성능을 최대로 유지시키기 위한 동작 방법을 제시할 수 있기 때문에 더욱 더 연구의 가속도가 붙는 것으로 판단된다. CSMA/CA 프로토콜 기반의 IEEE 802.11 DCF는 무선 네트워크 통신의 기본이 되는 MAC 프로토콜이며, 이것에 대한 이해와 분석 그리고 최적화 및 게임 이론적 접근 방법들을 통한 이론적 해석 등은 향후 다양한 무선 네트워크 통신 프로토콜 분석에 기본이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] *IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications*, August 1999, P802.11
- [2] M. J. Osborne and A. Rubinstein, *A Course in Game Theory*, The MIT Press, 1994
- [3] *Game Theory*, http://en.wikipedia.org/wiki/Game_theory
- [4] M. Felegyhazi and J-P. Hubaux, "Game Theory in Wireless Networks: A Tutorial", *EPFL Technical report*, June 28, 2006.
- [5] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function", *IEEE J-SAC*, vol. 18, no. 3, March 2000.
- [6] M. Cagalj, S. Ganeriwal, I. Aad and J-P. Hubaux, "On Selfish Behavior in CSMA/CA Networks", *INFOCOM*, March 2005
- [7] J. Konorski, "A Game-Theoretic Study of CSMA/CA Under a Backoff Attack", *IEEE/ACM Transactions of Networking*, vol. 14, no. 6, December 2006
- [8] M. J. Osborne, *Tutorial on Optimization and Difference and Differential Equations*, Toronto University, September 2006
- [9] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004
- [10] *Convex Optimization*, http://en.wikipedia.org/wiki/Convex_optimization
- [11] Y. Xiao, X. Shan and Y. Ren, "Game Theory Models for IEEE 802.11 DCF in Wireless Ad Hoc Networks", *IEEE Radio Communications Magazine*, March 2005
- [12] *IEEE J-SAC Upcoming Issues*, "Game Theory in Communication Systems", 2007, <http://www.jsac.ucsd.edu/Calls/GameTheorycfp.pdf>
- [13] J-P. Hubaux, <http://people.epfl.ch/jean-pierre.hubaux>