

최적의 CSMA 접속 기법 연구에 관하여

이 용, 윤세영

KAIST

요약

Carrier Sensing Multiple Access (CSMA)로 불리는 임의 접근 방식은 무선 통신 시스템에서 흔하게 사용되는 프로토콜이다. 이 CSMA 프로토콜은 데이터 전송에 앞서 자신의 링크 상황을 먼저 파악 한 후에 전송이 가능한 경우에 전송을 시도하는 방식이다. 매우 간단하며 분산적으로 동작이 진행되기 때문에 쉽게 실제 시스템에 적용되어 사용되고 있다. 이와 같은 간단하고 분산적인 CSMA 알고리즘이 최적 전송효율을 달성 할 수 있다는 사실이 최근에 밝혀졌다. 이러한 발견을 바탕으로 많은 연구들이 다양한 조건에서 전송효율을 극대화 시키는 방법에 대해 다뤘다. 본고에서는 최근의 이러한 연구 동향을 정리하고, 앞으로 해결해야 할 문제를 정리하였다.

I. 서론

Carrier Sensing Multiple Access (CSMA)는 실생활에서 가장 흔하게 만날 수 있는 전송 프로토콜 기법 중에 하나이다. 무선랜 공통규격인 IEEE 802.11 프로토콜이 대표적인 CSMA 프로토콜 중 하나이다. 이와 같은 CSMA 프로토콜의 기본 동작방법은 굉장히 간단하며 분산적으로 행하여 진다. 먼저 송신단말과 수신단말의 조합으로 구성된 각각의 링크들은 packet 이라 불리는 전송 단위를 주고 받기 전에 주변의 다른 링크들이 전송하고 있는지 먼저 살펴본다. 다른 주변 링크들과 동시에 전송을 하게 되면 전송하고 있는 packet 이 손상되어 전송이 실패할 수 있기 때문에, 어떠한 다른 주변 링크도 전송을 하지 않을 경우에만 전송을 시도한다. 또한 한 링크의 전송이 끝났을 경우에 동시에 주변에 있는 여러 링크가 전송을 시도 하지 못하도록 각 링크는 임의의 난수 시간 만큼 기다린 후에 전송을 시도하며, 전송이 성공 된 후에 일정시간 동안 전송을 지속하며 자신이 소유하고 있는 packet을 소모하게 된다.

이와 같은 CSMA 알고리즘은 다수의 링크가 존재하는 상황에

서 어떤 링크를 어느 순간에 전송하도록 할 것인가에 대한 스케줄링 방법이다. 스케줄링 기법에는 CSMA 말고도 굉장히 여러 가지 종류의 알고리즘이 제안되어왔는데, 각 스케줄링 알고리즘은 저마다 전송효율 극대화나 지연시간 최소화 혹은 공평한 서비스 제공을 목표로 설계되어 분석되어졌다. 그 중 가장 대표적인 스케줄링방식은 Max-Weight 라고 불리는 방법으로서, 전송효율을 극대화로 얻을 수 있다고 알려진 방법이다. 1992년에 소개된 이 연구는 이와 같은 성능 극대화를 통하여 엄청난 관심을 이끌었다.

하지만 Max-Weight 방법은 복잡도가 높으며, 중앙에서 제어하는 역할을 가진 단말이 존재하여야 한다는 점이 실제적인 시스템에 적용 시키기에 한계점으로 작용한다. Max-Weight의 발견 이후 후속연구로 굉장히 많은 문헌들이 발표되어왔다. 이들은 Max-Weight의 한계적인 복잡도를 줄이기 위한 방법들을 제시하였다. 복잡도를 줄이기 위하여 제안 방법들은 약간의 성능을 포기하게 되는데 전송효율을 조금 손해보거나, 지연시간이 조금 늘어가는 것과 같은 손해와 복잡도를 교환하는 모양의 결과들을 보여 주었다.

하지만 여전히 Max-Weight 기반의 전송효율 극대화 방안들은 높은 복잡도라는 문제점을 가지고 있다. Max-Weight가 소개된 후 대략15년 뒤인 2008년에 복잡도는 낮으면서 성능의 손해를 거의 가져오지 않는 방법이 소개되었다. 놀랍게도 굉장히 간단하며 분산적으로 동작 가능한 방법으로 실제 시스템에 많이 적용되었던 CSMA 프로토콜이 간단한 변형을 통하여 전송효율 극대화를 달성 할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 이와 같은 CSMA 기반의 전송효율 극대화 방법은 어떠한 제어신호 전달도 없이 간단한 방법으로 분산적으로 목표를 달성한다. 본고에서는 이와 같은 CSMA 알고리즘들을 다양한 분류방법에 따라 정리하였다.

분류1: (saturated 과 unsaturated) Traffic 특성에 따라서 분류 할 수 있다. 만약 각 링크가 이미 전송 할 packet을 무한정 가지고 있다면 (saturated) 전송효율을 최대화 시키기 위한 전송량 조절 방법을 제시할 것이고, 만약 시간에 따라 임의로 packet 이 각 링크에 도착한다면 (unsaturated) 각 링크에서

대기하는 packet의 수가 무한대로 발산하지 않도록 하는 방법을 제시하게 될 것이다.

분류 2: (Synchronous 와 asynchronous) 어떤 연구에서는 모든 링크가 같은 시계에 따라 같은 시간을 측정 할 수 있다는 가정하에 동시에 약속된 동작을 수행 할 수 있는 알고리즘을 생각하였다 (synchronous). 이와 같은 가정이 없는 경우에는 각 링크가 각자 동작을 하여도 무관하다 (asynchronous).

분류 3: (continuous 와 discrete time) 시간의 단위를 연속적으로 생각하는 방법 (continuous)과 일정한 시간 단위를 바탕으로 불연속 적인 시간을 생각하는 방법(discrete)이 있을 수 있다. 실제 사용되는 무선랜에서는 시간이 time-slot이라고 불리는 단위로 구성된 불연속적인 시스템이다.

분류 4: (time-varying channel 과 static channel) 대부분의 연구들은 링크의 전송 용량이 시간에 상관없이 고정된 값을 가진다고 생각 (static channel) 하였다. 하지만 몇 연구에서는 시간에 따라 변화할 경우에 대한 내용을 다루고 있다 (time-varying channel).

분류 5: (time-scale separation 사용여부) CSMA 스케줄링은 시간에 따라 임의로 접속하는 확률에 따라 전송량이 결정된다. 하지만 실제 이 알고리즘을 돌려서 나타나는 전송량이 이 확률값으로 도달하는데에 많은 시간을 필요로 하는데, 이러한 시간을 무시한 가정이 시간 단위 분리 (time-scale separation)라고 불리는 가정이다.

분류 6: (theory 와 implementation) 실제로 구현을 통하여 알고리즘의 성능을 확인한 연구들과 이론적인 한계를 기술한 연구들을 구분 할 수 있다.

II. CSMA 모델링과 목표

가. 모델링

무선 네트워크에서는 각 링크들의 전송이 퍼져 나가기 때문에 주변에 존재하는 다른 링크들에게 영향을 미치게 된다. 따라서 어떤 링크가 전송을 하고 있을 경우에는 그 링크 주변에 존재하는 다른 링크들은 전송을 하지 못하고 기다려야 한다. 이와 같은 현상을 표현하기 위하여 흔하게 쓰이는 방법은 그래프를 이용하는 것이다. 먼저 각 링크들을 점으로 표현 한 후에 서로 간섭을 미쳐서 동시에 전송을 못하게 되는 링크들을 선으로 연결하여 주변 이 그래프에서 서로 연결된 링크들은 동시에 전송을 못한다는 것을 표현 하는 그래프가 생성되게 된다. 이와 같은 그래프를 $G = (L, E)$ 로 표현하자. 여기서 L 과 E 는 각각 링크

집합과 링크간의 간섭을 표현한 선의 집합을 나타낸다. 각 링크가 스케줄링이 되고 있는지를 표현하는 스케줄링 벡터를 다음과 같이 표현한다고 하자: $\sigma := [\sigma_i : i \in L]$. 이 그래프에서 선으로 연결된 어떠한 두 링크도 동시에 전송 할 수 없기 때문에 σ 는 다음과 같은 조건 $\sigma_i + \sigma_j \leq 1, \forall (i, j) \in E$, 을 만족시켜야 충돌이 발생하지 않는다. 여기서 (i, j) 는 링크 i 와 j 사이에 선이 연결되어 있다는 것을 표현한다. 따라서 모든 가능한 스케줄링, 즉, 충돌이 발생하지 않는 스케줄링 벡터를 모두 모은 스케줄링 집합은 다음과 같이 표현되게 된다.

$$I(G) := \{ \sigma \in \{0, 1\}^n : \sigma_i + \sigma_j \leq 1, \forall (i, j) \in E \}.$$

그리고 이러한 네트워크의 네트워크 용량은 이 집합으로부터 다음과 같이 구하여진다.

$$C(G) := \left\{ \sum_{\sigma \in I(G)} \alpha_{\sigma} \sigma : \sum_{\sigma \in I(G)} \alpha_{\sigma} = 1, \alpha_{\sigma} \geq 0, \forall \sigma \in I(G) \right\}.$$

CSMA 프로토콜에 의하면 각 링크들은 전송하기 전에 자신의 링크 상황을 살펴본다. 만약 자신과 간섭을 일으키는 링크들 중 어느 하나라도 전송을 하고 있는 경우라면 충돌을 피하기 위하여 전송을 시도하지 않는다. 주변의 모든 링크가 전송을 하지 않고 있는 유향 상태에서만 전송을 시도하게 된다. 만약 자신의 이웃 링크가 전송을 하다가 멈추게 되어 전송이 가능한 상황이 발생하는 경우에는 곧바로 전송을 시도하는 것이 아니라 임의의 시간을 지켜 본 후에 전송을 시도한다. 이것은 충돌을 회피하기 위한 방법으로서 만약 이와 같은 동작이 없을 경우에는 동시에 전송을 시도하는 단말들로 인한 충돌이 발생하게 된다. 이와 같이 주변 링크의 전송을 지켜보는 과정을 백오프(backoff)라고 한다. 백오프 시간동안 이웃 링크의 전송이 없었다면 전송을 시작하여 일정시정 시간 동안 자신의 packet을 전송하게 된다. 이 전송 지속 시간을 홀딩타임(holding time)이라고 부른다. 직관적으로 어떤 링크 i 가 전송을 할 확률은 이 백오프와 홀딩 시간에 따라 결정되게 된다. 링크 i 의 평균 백오프 시간과 홀딩 시간을 각각 $1/b_i$ and h_i 라 칭하고, 분석의 용이함을 위하여 각 시간의 분포는 지수분포(exponential distribution)를 따른다고 한다면 스케줄링 프로세스(scheduling process) $\{\sigma(t)\}$ 는 시가역성 마르코프 프로세스(time reversible Markov process)가 되고, 안정상태의 분포(stationary distribution)는 다음과 같이 표현된다.

$$\pi_{\sigma}^{bh} = \frac{\prod_{i \in L} (b_i h_i)^{\sigma_i}}{\sum_{\sigma \in I(G)} \prod_{i \in L} (b_i h_i)^{\sigma_i}},$$

이 식을 살펴보면 안정상태의 분포는 $b_i \times h_i$, 즉 백오프와 홀딩 시간의 곱으로 표현 된다는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 이 곱을 다음과 같이 \log 를 활용하여 $r_i = \log(b_i h_i)$ 로 나타낸다면 이 값은 링크의 전송의지를 나타낸다고 볼 수 있다. 이 전송의지를 바탕으로 각 링크의 전송시도 확률을 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$s_i(\mathbf{r}) = \sum_{\sigma \in (G): \sigma_i=1} \pi_{\sigma}^{\mathbf{b}, \mathbf{h}} = \frac{\sum_{\sigma \in (G): \sigma_i=1} \exp(\sum_{j \in L} \sigma_j r_j)}{\sum_{\sigma \in (G)} \exp(\sum_{j \in L} \sigma_j r_j)}.$$

나. 목표

CSMA 스케줄링이 가지게 되는 목표는 시스템의 트래픽 특성이 무한정 존재하는(saturated) 상황 인지 도착하는 트래픽들을 처리해야 하는(unsaturated) 상황 인지에 따라 달라지게 된다.

Unsaturated system.: 만약 네트워크 전송용량으로 해결 가능한 트래픽이 링크들에게 들어온다면 최적의 스케줄링 기법은 이 트래픽들을 모두 전송 할 수 있어야 한다. 즉 모든 트래픽 도착 밀도 $\lambda \in C(G)$ 에 대하여 각 링크들은 자신의 전송량이 $s_i(\mathbf{r}^*) > \lambda_i$ 을 만족시켜야 한다. 따라서 unsaturated system에서의 CSMA 스케줄링의 목표는 다음과 같은 질문에 해답을 찾는 것이다.

모든 $\lambda \in C(G)$ 에 대하여 모든 링크들이 $s_i(\mathbf{r}) \geq \lambda_i$ 을 만족하도록 하는 전송의지의 값이 존재하는가? 그리고 만약 존재한다면 그 전송의지값을 찾아 낼 수 있을 것인가?

Saturated system. 각 링크들이 무한히 많은 전송할 packet을 가지고 있는 상황이다. 이 때에는 일단 최대한 많은 양을 전송 할 수 있도록 하는 것도 중요하지만 각 링크의 전송량을 어떻게 배분하여 전송 할 것인가도 중요하다. 예를들어 각 링크의 공평성을 생각 한다면 모든 링크들의 전송량을 다 같도록 하는 것이 최적 일 수 있다. 따라서 이와 같은 상황에서는 다음과 같이 네트워크의 효용을 최대화 시키는 문제를 푸는 것이 목표가 된다.

$$\max_{\mathbf{y}} \sum_{i \in L} U(y_i) \quad \text{subject to} \quad \mathbf{y} \in C(G)$$

여기서 $U(\cdot)$ 는 효용함수를 표현한다. 이때 CSMA 스케줄링은 다음과 같은 질문에 대한 해답을 도출해야 한다. “어떻게 이 최적화 문제의 해답인 전송의지 r_i^* 값을 $s_i(\mathbf{r}^*) = y_i^*$ 이 만족하도록 찾을 수 있을 것인가?”

III. CSMA 연구들

가. Unsaturated 의 기본 결과

[Jiang Walrand, 2010]에서는 모든 네트워크 전송용량 보다 작은 트래픽 밀도 λ 에 대하여 $s_i(\mathbf{r}^*) \geq \lambda_i, \forall i \in N$ 를 만족하는 전송의지 \mathbf{r}^* 가 존재한다는 것이 보여졌다. 이것은 CSMA 알고리즘이 최대전송효율 특성을 가질 수 있음을 의미한다. 그리고 이 연구 이후에 많은 스케줄링 기법들이 CSMA 를 바탕으로 최대전송효율을 얻어내는 방법들을 제시하였다. 그 방법들은 도착하는 packet 밀도와 서비스되어 나가는 packet의 밀도에 대한 관찰을 바탕으로 동작하는 서비스 밀도 기반(rate-based) 알고리즘과, 각 링크에 쌓이는 packet의 양에 기반하여 동작하는 대기량 기반(queue-based) 알고리즘으로 나누어 질 수 있다.

서비스 밀도 기반: [Jiang Walrand, 2010]에서는 전송의지 \mathbf{r} 값이 최적 값 \mathbf{r}^* 로 수렴하는 방법을 제안하였다. 이 논문의 한계점은 시간 단위 분리 가정을 사용하였다는 것이다. 즉 이 논문은 CSMA 알고리즘에 의한 마르코프 프로세스가 곧바로 안정상태에 들어간다는 가정하에서 사실이다. 그리고 후속 연구를 통하여 [Jiang et al., 2010]에서 시간 단위 분리 가정 없이 전송의지가 최적 값 \mathbf{r}^* 로 수렴한다는 것을 보여주었다. 대략적인 동작 방법은 다음과 같다. 먼저 링크 j 는 packet이 도착하는 양과 packet이 서비스 되는 양을 충분히 긴 시간동안 살펴본다. $\hat{\lambda}_j(j)$ 과 $\hat{s}_j(j)$ 를 각각 도착 밀도와 서비스 밀도의 추정치라고 한다면, 링크 j 자신의 전송의지 $r_j(j)$ 를 시간 $T(j)$ 에서 다음과 같이 재설정 한다.

$$r_j(j+1) = r_j(j) + \beta(j)(\hat{\lambda}_j(j) - \hat{s}_j(j)),$$

여기서 $\beta(j)$ 는 시간에 따라 감소하는 값이다. 이와 같은 방법으로 전송의지를 조절해 나가면 결국 전송효율 극대화를 달성 할 수 있다는 것이 이 연구를 통하여 보여졌다.

대기량 기반: 서비스 밀도 기반 알고리즘에서 서비스 되는 양을 제대로 측정하기 위하여는 상당히 긴 시간동안 살펴본 후 추정해야 한다. 따라서 이러한 방식의 알고리즘들은 상당히 긴 동작 시간을 필요로 하게 된다. 이것을 해결하기 위하여 각 링크에 쌓이는 packet의 양을 기반으로 하여 동작을 하는 대기량 기반 방식을 생각 할 수 있다. 이것은 Max-Weight 방식과 유사한 방법으로 동작하게 된다.

먼저 [Ni et al., 2010]에서는 Q-CSMA라고 명명된 알고리즘이 소개되었는데, 여기서는 전송의지값을 쌓여있는 packet의 양에 대한 함수로 결정하여 동작을 시켜 전송효율

극대화를 이룩하게 된다. 이 논문에서는 시간 단위 분리 가정 하에서 각 링크의 전송의지를 $r_i = f(Q_i)$ 와 같이 링크에 쌓이는 packet 양 Q_i 값으로 결정한다. 이 경우 스케줄링 σ 이 선택되는 확률이 $\exp(\sum_{i \in (G)} \sigma_i f(Q_i))$ 에 비례하게 되는데, 만약 어떤 스케줄링의 비중값(weight)이 최대치보다 멀어지게 되면 확률적으로 거의 선택이 되지 않게 되어 Max-Weight 알고리즘과 비슷한 성능을 내게 된다. 여기서 비중값은 $W(\sigma) = \sum_{i \in (G)} \sigma_i f(Q_i)$ 으로 계산되며 Max-Weight 방식이란 항상 weight가 큰 스케줄을 선택하여 서비스하는 방식으로 가장 대표적인 전송효율 극대화 알고리즘이다.

시간 단위 분리 가정을 사용하지 않은 대기량 기반 방법 역시 연구되었다. [Rajagopalan et al., 2009] 논문에서는 특정한 비중값 함수 f 예를 들어 $f(x) = \log \log(x)$ 와 같은 함수에서 Max-Weight 과 같이 동작하여 최대효율을 얻을 수 있음을 보였다. 이 연구의 핵심은 이 CSMA 의 동작을 결정하는 전송의지가 시시각각 변화하여 시간 단위 분리 가정 없이는 분석이 힘들었던 것을 천천히 증가하는 weight 함수를 통하여 마치 전송의지가 거의 변화하지 않는 동안 스케줄링의 동작이 안정상태에 도달하는 것처럼 보이게 하여 분석을 하였다. 다만 이 증명들에서는 네트워크 전체에서 가장 많이 packet이 쌓여 있는 양이 필요하게 된다. 맨 처음에는 주변 링크들과의 정보교환을 통하여 이 정보를 획득하여 최대효율을 얻을 수 있다고 증명을 하였고, 후속연구 [Shah et al., 2011] 에서는 이러한 정보교환 없이도 적절한 추정방법을 통하여 최대효율을 얻을 수 있음을 증명하였다.

나. 시간 단위 분리 가정

어떤 마르코프 프로세스가 안정상태로 접어들기 위하여는 어느정도 충분한 시간이 필요하다. 안정상태란 마르코프 프로세스의 확률적 분포가 이 프로세스를 정의하는 천이율에 따라 결정되는 확률적인 특성을 가지게 되는 상황으로서 이 안정상태에 있어야 해당 서비스 밀도를 확률적으로 계산 할 수 있게 된다. 따라서 이와 같은 안정상태로 접어들기 전에 마르코프 프로세스의 속성이 변화하게 된다면 확률적인 계산이 불가능해지기 때문에 분석이 매우 힘들어지게 된다. 이것이 CSMA 연구의 어려운 부분이다.

[Jiang Walrand, 2010, Ni et al., 2010, Kim et al., 2011, Qian et al., 2010], 와 같은 몇몇 연구에서는 “시간 단위 분리”라 불리는 가정을 이용하여 이 문제를 쉽게 해결하였다. 이 가정은 매 순간마다 마르코프 프로세스는 즉시 안정상태에 들어 간다는 가정으로서 이 가정하에 CSMA 연구는 마르

코프 프로세스의 특성으로부터 얻어지는 성능만 파악하면 되는 문제로 변화하게 된다.

시간 단위 분리 가정을 사용하지 않고 증명을 한 연구들은 크게 두 가지 방법으로 CSMA의 성능을 분석해내었다. 먼저 [Rajagopalan et al., 2009, Shah et al., 2011, Shah Shin, 2012] 에서와 같이 각 링크들은 자신의 전송의지를 자신에게 쌓인 packet의 양에 따라 결정하는데, 이때 결정 함수를 $\log \log(Q_i)$ 와 같이 굉장히 느리게 증가하는 함수를 사용하게 되면 이 전송의지가 변화하는 속도가 안정상태로 접어드는 속도보다 훨씬 느리게 되어 마치 고정적인 마르코프 프로세스인 것처럼 동작을 하게 된다. 다른 방법은 [Liu et al., 2010] 와 [Jiang et al., 2010] 와 같이 각 링크들이 자신에게 들어오는 packet의 양과 서비스 되는 양을 일정 구간동안 조사하고 그 값을 바탕으로 자신의 전송의지를 조절하게 될 때 이 조사하는 구간의 길이를 시간이 갈수록 점점 길게 하여 결국 안정상태에 한참 머문 후에 마르코프 프로세스의 특성이 변화하도록 하는 방법이 된다.

다. 시간에 대한 정의

먼저 모든 시간이 연속적으로 흐른다고 생각을 할 수 있다. 이와 같은 가정하에서는 백오프나 홀딩 시간 역시 연속적인 시간 값을 가지게 된다. 이와 같은 시간 정의에서는 링크 상황을 살피거나 주변 링크의 전송 여부를 파악하는 것은 아무런 시간 소모 없이 가능하다는 가정이 필요하다. 이와 같은 가정이 없으면 연속시간 모델을 정의하기가 힘들어진다. 따라서 연속시간 상황에서는 링크 상황을 완벽하게 살필 수 있기 때문에 충돌이 일어날 수 없으며 분석이 조금 더 용이하게 된다.

하지만 실제 시스템에서는 시간이 연속적으로 정의 되지 못한다. 예를 들어 대표적인 시스템인 IEEE 802.11 시스템에서는 20 μ 초의 기본 시간 단위를 바탕으로 동작 한다. 이와 같은 불연속적인 시간속에서는 각 링크들은 그 전 시간단위에서의 관찰을 바탕으로 하여 이웃 링크의 전송 상황을 파악하고 전송 여부를 결정하게 된다. 이와 같은 불연속 시간 상황에서는 백오프가 자연수의 값을 가지게 되기 때문에 동시에 두 링크가 같은 백오프 값을 가지고 전송을 시도하는 경우가 발생 할 수 있다. 이와 같은 분석은 조금 더 사실에 가깝지만 충돌에 의하여 분석을 더 복잡하게 만드는 요인이 된다.

기존 연구들에서는 두 가지 방식으로 이 불연속적인 시간의 충돌 문제를 해결하였다. 먼저 [Jiang Walrand, 2011, Shah et al., 2011] 와 같은 방법에서는 백오프 시간을 늘려주는 방법을 생각 하였다. 전송의지는 백오프와 홀딩 시간에 따라 결정

이 되고, 이 전송의지 값에 의하여 네트워크의 성능이 결정되기 때문에 이 전송의지만 맞추어 주면 성능최적화를 달성하는데 전혀 문제가 없다. 따라서 백오프와 홀딩 시간을 동시에 늘려주어 전송의지를 고정 시킬 수 있는데, 백오프가 늘어나게 되면 충돌 확률이 줄어들게 되어 결국 충돌을 거의 무시 할 수 있게 된다. 하지만 이와 같은 방법은 실제에 적용하기에 약간 문제점이 존재한다. 한번 링크가 전송을 시도한 후에 너무 긴 시간동안 전송을 지속하게 되어 네트워크의 지연을 늘리거나 순간적으로 공평성을 훼손하게 된다. [Liu et~al., 2009, Liu et~al., 2010] 에서는 이러한 상관 관계에 대한 논의를 다루었다.

만약 모든 링크가 공통의 시간을 공유한다는 가정을 하게 된다면 문제는 조금더 쉬워진다. 시간 동기화(Time-synchronized) 라고 불리는 이 가정하에서는 모든 링크가 정해진 시간에 정해진 동작을 할 수 있다. 따라서 몇몇 연구에서는 이 가정을 통하여 시간을 프레임(frame) 단위로 나누고 프레임(frame)을 제어 구간과 전달 구간으로 나눈다. 그 후에 구분된 제어 구간에서 전달 구간에서 송신을 할지 혹은 진행중인 송신을 멈출지와 같은 동작을 취할 수 있는 링크들을 충돌이 나지 않도록 선택하고, 전달 구간에서 전송을 시작할지 혹은 진행중인 전송을 멈출지에 대한 선택을 선택된 링크만 할 수 있도록 한다. 이와 같은 방법으로 충돌 발생을 방지하여 분석을 용이하게 하였다.

라. 채널 변화

대부분의 연구에서는 링크가 전송을 시도하면 충돌이 일어나지 않는 한 아무 문제없이 packet이 성공적으로 전송된다고 생각 하였다. 이것은 링크의 채널상황을 무시한 것으로 고정된 링크의 전송용량을 가정한 것이다. 하지만 실제 네트워크에서는 시간에 따라 링크의 전송용량이 변화하게 되며, 충돌이 없이도 전송이 실패하는 경우가 생길 수 있다. 최근들어 [Li Eryilmaz, 2012, Yun et~al., 2012] 와 같은 연구에서 이와 같은 시간에 따라 변화하는 링크의 전송용량을 고려하기 시작하였다. 먼저 [Li Eryilmaz, 2012] 에서 시변의 채널 상황에서의 CSMA 성능변화를 생각하였는데, 이 연구는 모든 링크가 서로 간섭을 미치는 상황에 대하여 연구를 진행하였고 시간 단위 분리를 이용하였다. 일반적인 상황을 가정한 첫번째 연구는 [Yun et~al., 2012] 이다. 이 연구에서는 각 링크의 전송용량이 시간에 따라 0과 1 사이에서 변화하는 환경을 생각 하였다. 기존 연구와 달리 모든 네트워크 구조를 고려하였으며 채널 변화 속도에 따라 성능이 어떻게 변화하는지에 대한 이론적인 연구를 진행하였다. 이 논문에서는 채널 변화 속도가 빠른 경우에는 오히

려 채널 변화에 따라 적응적으로 동작하는 것이 성능 저하를 불러 올 수 있음을 보였으며 채널 변화 속도가 충분히 느리면 채널 변화에 적응적으로 동작 할 경우에 전송효율의 이론적 최대 값에 도달 할 수 있음을 확인 하였다.

마. 지연시간

전송효율 극대화에 관한 연구와 더불어 지연시간에 대한 연구 역시 진행되었다. 하지만 전송효율 극대화에 대한 연구와는 달리 극히 일부분에 대한 내용만 밝혀졌다. [Shah et~al., 2009] 에서는 CSMA 와 같이 복잡도가 낮은 알고리즘을 통하여 높은 전송효율과 작은 지연시간을 동시에 달성 할 수 없다는 것을 보여주었다. 따라서 작은 지연시간을 달성하기 위하여는 CSMA를 변형시켜야 한다. [Shah Shin, 2010] 에서는 적은 지연시간을(여기서 적은 지연시간은 $O(1)$ 의 지연을 의미한다.) 색칠하기(coloring) 알고리즘을 통하여 다항식 증가 구조(polynomial growth)의 네트워크 구조 상에서 달성하였다. 또한 주기적으로 전송하고 있는 모든 링크들이 자신의 전송을 멈추는 작업을 하게 되면 역시 적은 전송 지연 시간을 얻을 수 있음을 [Lotfinezhad Marbach, 2011]에서 보여주었다.

이러한 CSMA 알고리즘의 변형 없이 CSMA의 지연 시간을 분석하고 지연 시간을 줄이려는 노력 역시 존재한다. 이 방법들은 정해진 전송의지에 대하여 백오프와 홀딩 시간을 어떻게 가져가는지에 따라 지연시간이 어떻게 변화하는지에 대한 관계를 고찰하였다. 지연시간 연구에서 가장 흔하게 쓰이는 방법은 섞임 시간(mixing time)이라고 불리는 마르코프 프로세스가 안정상태에 들어가는데 까지 걸리는 시간을 이용하는 방법이다. 이 섞임 시간이 일종의 지연시간의 근사값을 제시하는데 그 원하는 섞임 시간 동안에는 마르코프 프로세스의 원하는 성능이 나오지 않는 것이 전송지연을 유발한다는 점을 활용하였다. [Shah Shin, 2010, Jiang et~al., 2011]들이 이러한 방법을 이용하였는데, [Jiang et~al., 2011] 에서는 동시 다발적인 전송 변화에 따라 이 섞임 시간이 줄어들 수 있음을 보였다. 하지만 최근 [Subramanian Alanyali, 2011] 논문을 통하여 섞임 시간이 지연 시간과 밀접한 연관이 있다는 기존의 직관들이 사실이 아닐 수 있다는 것이 보여졌다. 그리고 [Lee et~al., 2012] 연구를 통하여 섞임 시간이 아닌 근사적 분산이라는 수치가 지연 시간과 더 밀접한 연관이 있다는 사실을 보여지게 되었다.

바. 실제 상황에 대한 고려와 구현

이상적인 상황에서의 연구를 조금 더 실제 상황에 맞도록 발전시켜 나간 연구들도 존재한다. 먼저 [Kim et~al., 2011] 에

서는 주변 링크들의 전송정보를 파악하는 것이 완벽하지 않을 때에 어떤 상황이 발생하는지를 살펴 보았다. 예를 들어 간섭을 발생시킬 수 있는 링크가 전송하고 있지만 아무도 전송하고 있지 않다고 판단 할 수 있는데, 이와 같은 상황에서 전송을 해 버리면 예상하지 못한 충돌이 발생해 버린다. 하지만 이 연구에서는 이와 같은 이상적이지 않은 주변 링크에 대한 정보 파악을 통하여도 여전히 전송효율 극대화를 이룰 수 있음을 보여주었다. 이와 같은 성능은 앞에서 충돌이 존재하여도 높은 성능을 얻을 수 있었던 것과 같이 백오프와 홀딩 시간을 길게 가져가서 이와 같은 충돌의 비율을 낮추는 방법을 생각 하였다.

[Qian et~al., 2010]에서는 좀더 사실적인 네트워크 구조를 생각하였다. 기존 연구들이 가정한 graph를 활용한 간섭 링크의 표현은 실제 네트워크를 간략화 시켜서 표현 한 것이다. 사실은 멀리에서 전송하는 링크들의 전송 또한 도착하여 간섭을 증가시키게 되며 이와 같은 간섭이 계속 쌓이게 되면 이웃 링크가 전송을 하지 않더라도 전송을 할 수 없는 상황이 발생한다. 이와 같은 것을 표현 하는 방식이 SINR 방식이라고 불리는데 이 논문에서는 이 SINR 방식에서의 성능에 대한 문제를 풀었다.

이론적인 연구에서 발전하여 실제로 시스템을 구현한 연구들도 존재한다. [Lee et~al., 2009, Nardelli et~al., 2011]에서는 무선랜을 변형시켜 전송효율을 극대화 시키는 프로토콜을 실제로 구현하였다. 구현 과정에서 이론과 실제의 차이를 몇 가지 발견하였는데, 이론에서 고려하지 못한 여러 가지 요소들이 실제로 존재하여 성능을 저하시킨다는 것을 보였다. [Chen et~al., 2011, Lee et~al.,] 연구들에서는 TCP와 최적의 CSMA에 대한 관계를 구현을 통하여 풀어 내었으며 [Lee et~al., 2012] 연구가 이러한 구현 선상에 있는 가장 최근 연구이다.

사. 남은 문제들

[Shah et~al., 2011, Shah Shin, 2012]에서는 각 링크들이 전송의지 값을 자신에게 쌓여 있는 packet의 수에 따라 조절해 나갈 경우에도 최대 전송 효율을 얻을 수 있음을 보여 주었다. 하지만 이 연구들에서는 전체 네트워크에서 이 packet 수의 최대값에 대한 정보가 필요하며, 이 정보가 없을 경우에도 여전히 최대 전송 효율을 달성 할 수 있는지에 대한 의문이 남아 있다. 또한 loglog 가 아닌 다른 함수에 대하여도 여전히 같은 말을 할 수 있을지에 대한 것도 의문으로 남아 있다. 또 남아있는 문제는 전송지연에 관한 의문이다. 아직 전송지연에 대한 연구는 많이 부족하며 이에 대한 연구가 많이 필요하다.

IV. 결론

굉장히 많은 연구가 효과적인 접속 스케줄링 기법에 대하여 연구하였다. 하지만 전송효율을 높이려는 알고리즘은 대부분 복잡하였으며 복잡도를 줄이려면 약간의 성능 손해를 감수하여야만 했다. 하지만 최근 들어 CSMA라는 굉장히 간단한 알고리즘으로 전송효율 극대화를 이룰 수 있다는 사실이 밝혀졌으며, 그 이후 많은 후속연구들이 진행되었다. 본문에서는 이와 같은 연구들을 각 논문들이 생각하고 있는 가정과 기여를 바탕으로 정리하였으며 이론과 실제의 관계에 대한 고찰 역시 제시하였다. 또한 이 분야의 연구에서 아직 풀어야 할 숙제들을 정리하였다. 이 정리를 통하여 최근에 많은 주목을 받고 있는 CSMA 연구에 대한 이해도를 높이고 독자들이 남아 있는 문제들을 풀어 내었으면 하는 바람이다.

참고 문헌

- [Chen et~al., 2011] Chen, W., Wang, Y., Chen, M. & Liew, S. C. 2011. "On the performance of tcp over throughput-optimal CSMA." In Proceedings of IWQoS.
- [Hegde Proutiere, 2012] Hegde, N. & Proutiere, A. 2012. "Simulation-based optimization algorithms with applications to dynamic spectrum access." In Proceedings of CISS.
- [Jiang et~al., 2011] Jiang, L., Leconte, M., Ni, J., Srikant, R. & Walrand, J. 2011. "Fast mixing of parallel Glauber dynamics and low-delay CSMA scheduling." In Proceedings of Infocom.
- [Jiang et~al., 2010] Jiang, L., Shah, D., Shin, J. & Walrand, J. 2010. "Distributed random access algorithm: scheduling and congestion control." IEEE Transactions on Information Theory, 56 (12), 6182 - 6207.
- [Jiang Walrand, 2010] Jiang, L. & Walrand, J. 2010. "A distributed CSMA algorithm for throughput and utility maximization in wireless networks." IEEE/ACM Transactions on Networking, 18 (3), 960 - 972.
- [Jiang Walrand, 2011] Jiang, L. & Walrand, J. 2011. "Approaching throughput-optimality in distributed

- csma scheduling algorithms with collisions.” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 19 (3), 816–829.
- [Kim et al., 2011] Kim, T. H., Ni, J., Srikant, R. & Vaidya, N. 2011. “On the achievable throughput of csma under imperfect carrier sensing.” In *Proceedings of Infocom* pp. 1674–1682,.
- [Lee et al., 2012] Lee, C.-H., Eun, D. Y., Yun, S.-Y. & Yi, Y. 2012. “From Glauber dynamics to Metropolis algorithm: smaller delay in optimal CSMA.” In *Proceedings of ISIT*.
- [Lee et al.,] Lee, J., Lee, H.-W., Yi, Y. & Chong, S. “Improving TCP performance over optimal CSMA in wireless multi-hop networks.” To appear in *IEEE Communication Letters*, 2012.
- [Lee et al., 2009] Lee, J., Lee, J., Yi, Y., Chong, S., Proutiere, A. & Chiang, M. 2009. “Implementing utility-optimal CSMA.” In *Proceedings of Allerton*.
- [Lee et al., 2012] Lee, J., Yi, Y., Chong, S., Nardelli, B., Knightly, E. & Chiang, M. 2012. “Making 802.11 DCF Optimal: Design, Implementation, and Evaluation.” *ArXiv e-prints*, .
- [Liu et al., 2009] Liu, J., Yi, Y., Proutiere, A., Chiang, M. & Poor, H. V. 2009. “Maximizing utility via random access without message passing.” *Technical report Microsoft Research Labs, UK*.
- [Liu et al., 2010] Liu, J., Yi, Y., Proutiere, A., Chiang, M. & Poor, H. V. 2010. “Towards utility-optimal random access without message passing.” *Wiley Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*, 10 (1), 115–128.
- [Li Eryilmaz, 2012] Li, B. & Eryilmaz, A. 2012. “A Fast-CSMA Algorithm for Deadline-Constrained Scheduling over Wireless Fading Channels.” *ArXiv e-prints*, .
- [Lotfinezhad Marbach, 2011] Lotfinezhad, M. & Marbach, P. 2011. “Throughput-optimal random access with order-optimal delay.” In *Proceedings of Infocom*.
- [Nardelli et al., 2011] Nardelli, B., Lee, J., Lee, K., Yi, Y., Chong, S., Knightly, E. & Chiang, M. 2011. “Experimental evaluation of optimal CSMA.” In *Proceedings of Infocom*.
- [Ni et al., 2010] Ni, J., Tan, B. & Srikant, R. 2010. “Q-csma: queue-length based CSMA/CA algorithms for achieving maximum throughput and low delay in wireless networks.” In *Proceedings of Infocom*.
- [Proutiere et al., 2010] Proutiere, A., Yi, Y., Lan, T. & Chiang, M. 2010. “Resource allocation over network dynamics without timescale separation.” In *Proceedings of Infocom*.
- [Qian et al., 2010] Qian, D., Zheng, D., Zhang, J. & Shroff, N. 2010. “CSMA-based distributed scheduling in multi-hop MIMO networks under SINR model.” In *Proceedings of Infocom*.
- [Rajagopalan et al., 2009] Rajagopalan, S., Shah, D. & Shin, J. 2009. “Network adiabatic theorem: an efficient randomized protocol for contention resolution.” In *Proceedings of ACM Sigmetrics*, Seattle, WA.
- [Shah et al., 2011] Shah, D., Shin, J. & Tetali, P. 2011. “Medium access using queues.” In *Proceedings of Foundations of Computer Science (FOCS)* pp. 698–707, IEEE.
- [Shah Shin, 2010] Shah, D. & Shin, J. 2010. “Delay optimal queue-based CSMA.” In *Proceedings of ACM Sigmetrics*.
- [Shah Shin, 2012] Shah, D. & Shin, J. 2012. “Randomized scheduling algorithm for queueing networks.” *Annals of Applied Probability*, 22, 128–171.
- [Shah et al., 2009] Shah, D., Tse, D. N. C. & Tsitsiklis, J. N. 2009. “Hardness of low delay network scheduling.” *IEEE Transactions on Information Theory*, . submitted.
- [Subramanian Alanyali, 2011] Subramanian, V. & Alanyali, M. 2011. “Delay performance of CSMA in networks with bounded degree conflict graphs.” In *Proceedings of ISIT* pp. 2373–2377,.
- [Tassioulas Ephremides, 1992] Tassioulas, L. & Ephremides, A. 1992. “Stability properties of constrained queueing systems and scheduling for maximum throughput in multihop radio networks.” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37 (12), 1936–1949.
- [Yi Chiang, 2011] Yi, Y. & Chiang, M. 2011. “Next-Generation Internet Architectures and Protocols.” Cambridge University Press. Chapter 9: Stochastic

network utility maximization and wireless scheduling.

[Yun et al., 2012] Yun, S.-Y., Shin, J. & Yi, Y. 2012. "Medium access over time-varying channels with limited sensing cost." ArXiv e-prints, .

약 력



이 용

1997년 서울대학교 공학사
1999년 서울대학교 공학석사
2006년 University of Texas at Austin 공학박사
2006년~2008년 Princeton University 박사후 연구원
2008년~현재 KAIST 전기 및 전자공학부 부교수
관심분야: 컴퓨터 네트워크, 무선통신망설계, Ad-hoc 네트워크, 통신망 경제, 저전력 통신



윤 세 영

2006년 KAIST 공학사
2012년 KAIST 공학박사
2012년~현재 KAIST 박사후 연구원
관심분야: CSMA, 통신망 경제, 펌토셀