

CSMA 기반 무선 애드 혹 네트워크에서 반송파 감지 반경의 반복적 근사 기법

정희원 설재영*, 종신회원 김성륜*o

Iterative Approximation of Carrier Sensing Radius in CSMA-based Wireless Ad Hoc Networks

Jae Young Seol* *Regular Member*, Seong-Lyun kim*o *Lifelong Member*

요 약

최근 CSMA가 많은 무선 환경에서 적용됨에 따라 CSMA 기반의 무선 네트워크의 성능을 높이기 위한 다양한 통계적 분석이 수행되고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 여전히 CSMA가 가지고 있는 작위적 특성은 네트워크의 분석을 어렵게 만들고 있다. 기존의 많은 연구들은 대규모 CSMA 네트워크의 통계적 분석에서 노드의 반송파 감지 기능을 표현하기 위해 반송파 감지 반경을 도입하여 사용해 왔다. 그러나 반송파 감지 반경은 노드의 전송 여부에 따른 노드 간 간섭효과를 고려하지 않기 때문에 간섭이 큰 채널 환경에 적용되는 경우 분석 오류를 피하기 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자, 노드 간 간섭효과를 고려한 물리적 모델 기반의 반송파 감지 반경을 유도하는 알고리즘을 제안한다. 이를 위해 대규모 CSMA 네트워크에서의 반송파 감지 동작 특성과 이에 따른 간섭효과를 분석하고, 분석 결과를 토대로 물리 모델에 근사된 반송파 감지 반경을 찾기 위한 감지 반경의 반복적 근사 기법을 제안한다. 제안된 알고리즘의 적합성을 확인하기 위해 모의실험을 통해 제안된 감지 반경을 이용해 다양한 채널 환경에서 유도된 총 간섭 모델의 정확성을 비교 분석하였다.

Key Words : carrier sensing, wireless network, ad hoc, CSMA, aggregate interference

ABSTRACT

Recently, as CSMA technique has been increasingly adopted in various wireless networks, extensive researches to analyze the statistical characteristics of CSMA-based wireless networks have been done. Despite the ongoing efforts, there still remain many difficulties in the analysis because of unexpectable operational behavior of CSMA. Previous literature studying CSMA networks used the concept of the carrier sensing radius to reflect the carrier sensing function. However, since the carrier sensing radius based on the protocol model is not affected by the aggregate interference from other nodes, the derived statistical models cannot avoid approximation errors especially if the network is under high interference. In this paper, we propose an algorithm to derive the carrier sensing radius considering the physical model, where the carrier sensing radius reflecting the aggregate interference is found. For the purpose of this, we analyze the aggregate interference model and the behavior of CSMA function. Based on the analysis, we propose an iterative approximation algorithm for the physical carrier sensing radius. Extensive simulations and results show that the proposed algorithm can contribute to considerably reduce the statistical modeling error of a CSMA network under various channel conditions.

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행됨. (NIPA-2011-C1090-1111-0006)

* 연세대학교 전기전자공학과 무선자원최적화연구실(jyseol, slkim)@ramo.yonsei.ac.kr, (° : 교신저자)
논문번호 : KICS2011-09-400, 접수일자 : 2011년 9월 18일, 최종논문접수일자 : 2011년 11월 28일

1. 서 론

최근 무선 단말 기술의 발달로 인해 스마트폰이나 스마트 패드와 같은 대용량의 모바일 데이터를 사용하는 스마트 디바이스의 수가 폭발적으로 증가하고 있다. 많은 수의 스마트 디바이스는 이동 통신 시스템의 부하를 과도하게 증가시켜 서비스 장애를 유발하게 되는데, 이동 통신 시스템의 자원 제약에 따른 서비스 품질 저하를 완화하고 무선 네트워크 부하를 분산시키기 위한 방안으로 최근 WiFi 서비스를 빠르게 도입하고 있다.

WiFi는 2.4GHz의 ISM (Industrial Scientific and Medical) 밴드를 사용하여 주파수 사용에 대한 라이선스 없이 자유롭게 사용가능하며, 주로 근거리 무선망의 구성에 사용된다. WiFi는 CSMA (Carrier Sensing Multiple Access) 를 MAC (Media Access Control) 프로토콜로 사용한다. CSMA는 노드에 전송할 패킷이 존재하는 경우, 바로 전송하지 않고 일정시간 채널에 다른 전송이 있는지를 감지한 후에 채널이 사용되지 않고 있다는 것으로 판단되면 전송을 시도한다. 그러나 이러한 단순한 구조는 숨은 노드 문제 (Hidden terminal problem)로 인해 전송 중 패킷의 충돌이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 도입된 부가적인 프로토콜이 두 노드 간에 RTS (Request To Send)/CTS (Clear To Send) 제어 패킷을 교환하는 CA (Collision Avoidance)이며, 이는 노출 노드 문제 (exposed terminal problem)를 포함하여 네트워크 성능을 떨어뜨리는 단점이 있다.

부하 분산의 목적으로 도입되는 WiFi 서비스의 다양한 장점에도 불구하고 간섭에 대한 고려 없이 설치되는 AP (Access Point)로 인한 노드 간 간섭 증가는 다시 서비스 품질의 저하 문제를 유발시키고 있다. 이에 따라 신호 간섭에 따른 문제점을 방지하고 시스템 성능을 최대화하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구의 바탕으로 대규모 네트워크에서 성능 문제를 고려하기 위한 정확한 통계적 모델이 요구되며, 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다^[1].

무선 네트워크의 통계적 분석은 접근 방법에 따라 크게 프로토콜 모델 기반 방식과 물리 모델 기반 방식의 두 가지로 구분될 수 있다^[2]. 프로토콜 모델에서 노드의 통신 반경 또는 반송파 감지 반경은 원으로 단순화되며, 이를 통해 네트워크를 그래프 분석 기법 등에 적용하여 분석하는 것이다. 대표적으로 토폴로지 제어와 네트워크 연결성 분석 등이 있다^[3]. 반면, 물리모델 기반의 분석 기법은 통신 및 신호 감지를 채널을 통과

한 수신 신호의 강도로 표현하며 주로 네트워크의 성능 분석이나 최적화 등에서 사용된다^[4]. 물리모델이 실제 시스템에 더 가깝고 오류가 적다는 장점이 있지만, 분석을 위해 노드 간의 모든 신호 간섭을 고려되어야 하기 때문에 대규모 네트워크의 통계적 분석 연구에 적용하지 쉽지 않다는 단점이 있다.

많은 CSMA 네트워크의 총 간섭량 통계 모델을 제시하려는 연구에서 프로토콜 모델 기반의 반송파 감지 반경을 적용하고 있는데, 반송파 감지 임계치 대신 감지 반경을 사용하는 경우, 동시 전송하는 노드 간의 간섭이 전송 노드에 미치는 영향을 고려하지 않기 때문에 분석이 보다 쉬워진다. 그러나 이러한 단순화된 가정과 달리 실제 시스템에서는 총 간섭이 동시 전송하는 노드의 밀도에 직접적인 영향을 받으며, 또한 노드의 전송 여부가 다른 노드로부터의 간섭 합인 총 간섭에 의해 영향을 받게 된다. 따라서 노드 간 간섭효과가 고려되지 않은 반송파 감지 반경이 통계 모델에 적용되는 경우, 이에 따른 오류를 피하기 어렵다.

프로토콜 모델 기반 반송파 감지 반경의 문제점을 그림 1에서 설명하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 프로토콜 모델 기반의 고정된 반송파 감지 반경이 R_{cs1} 로 설정된 경우, 해당 반경 내에 전송하는 노드가 없을 경우 중앙의 노드는 전송이 허용된다. 그러나 실제로 물리적 모델 관점에서 보면, R_{cs1} 안에 동시 전송하는 노드가 없더라도 TX_1 과 TX_2 의 간섭 합이 감지 임계치를 넘게 되면 노드는 전송을 하지 않게 되므로, 이 경우 실질적인 반송파 감지 반경은 R_{cs2} 가 된다. 이러한 CSMA 노드의 물리적인 동작 특성을 통계적 분석에 적용하기 위해 반송파 감지 반경을 주변 노드의 전송 확률을 고려한 모델이 제시되었으나^[5], 값을 도출하는 과정의 복잡도가 비교적 높다.

본 논문에서는 네트워크 채널의 간섭효과를 반영한 반송파 감지 반경을 도출하는 방안을 제시한다. 제안된 알고리즘을 통해 유도된 물리 모델 기반의 반송파 감지 반경은 기존의 프로토콜 모델에 기초한 반송파 감지 반경과 달리 네트워크에서 발생하는 노드 간 다

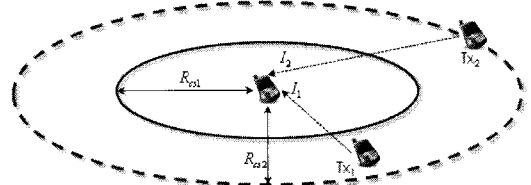


그림 1. 총 간섭에 따른 반송파 감지 반경의 변화

양한 채널 조건에서의 간섭효과를 효과적으로 반영한다. 따라서 본 논문에서 제안된 반송파 감지 알고리즘은 CSMA 네트워크의 총 간섭 통계 모델이나 네트워크의 용량 스케일 분석 등의 다양성에 연구에 활용되어 해당 연구 결과의 정확성을 높이는 데 기여할 것이다.

효과적인 알고리즘 설계를 위해 네트워크 내의 노드가 주변 노드들로부터의 신호 간섭과 감지 임계치에 따라 어떠한 방식으로 동작하는지를 총 간섭량 통계모델을 사용하여 분석한다. 이를 위해 최근 인지 무선 (Cognitive Radio) 연구에서 많이 적용되고 있는 cumulant를 이용한 총 간섭 통계 분석 방법^[6-10]을 이용한다. 분석 결과를 토대로 간섭효과를 반영한 물리적 모델에 기초한 반송파 감지 반경을 유도하는 반복적 근사 알고리즘을 제안하고, 제안된 알고리즘의 적합성을 평가하기 위해 다양한 모의실험을 수행한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 본 논문에서 분석할 시스템 모델을 네트워크 모델과 채널 모델로 구분하여 설명한다. CSMA의 반송파 감지 동작 특성 분석과 네트워크에서의 총 간섭 모델을 유도, 그리고 총 간섭을 이용하여 반복적인 근사 방법을 통한 반송파 감지 반경을 결정하는 알고리즘은 III장에서 제시된다. IV장에서는 III장에서 얻어진 결과가 채널 상태에 따라 어떻게 달라지는지를 알아보기 위해 수행된 모의실험 결과를 분석한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결과를 제시한다.

II. 시스템 모델

2.1 네트워크 모델

2차원 무한 영역에 무작위로 배치된 노드들로 구성된 무선 네트워크를 고려한다. 네트워크는 λ 의 노드 밀도를 갖는 노드들을 포함하며, 무작위 배치된 노드들은 포아송 점 과정 (Poisson point process)을 따른다. 모든 노드는 고정된 전송 전력 p 를 사용하여 전송하며, 각 노드에는 항상 전송할 패킷이 존재하는 것으로 가정한다.

노드들은 MAC 프로토콜로 CSMA를 사용하며, CA 기능은 본 연구의 범위에 포함되지 않으므로 사용하지 않는 것으로 가정한다. 노드는 전송 준비 상태가 되면 일정 시간 동안 채널의 반송파를 감지한다. 이때 감지한 신호의 크기가 반송파 감지 임계치인 I_{cs} 를 초과하는 경우 노드는 전송을 보류하고 백오프하여 동시 전송에 의한 패킷 충돌을 피한다. 노드는 채널이 비어 전송이 가능해질 때까지 채널 감지와 백오프

프를 반복한다. 이 때, 채널에서 감지된 신호는 단일 노드로부터의 전송 신호이거나 네트워크에 동시 전송하는 노드 세트 Π_T 로부터의 개별 간섭 신호 I_k 의 합이다. 따라서 노드의 전송 허용 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$I_A = \sum_{k \in \Pi_T} I_k \leq I_{cs} \quad (1)$$

2.2 채널 모델

노드의 전송 신호는 채널의 페이딩과 전송 경로 손실에 의해 수신 노드에서 감쇄된 전력으로 수신되며, 다음과 같이 표현된다.

$$p_r = Wg(d)p \quad (2)$$

여기서 경로 손실 $g(d) = d^{-\alpha}$ 은 송신 노드와 수신 노드 사이의 거리 d 와 경로 손실 지수 α 의 관계식이며, 채널의 페이딩은 쉐도잉에 의한 슬로우 페이딩으로 가정하며, 이 값은 $W = e^{oX}$ 의 lognormal 랜덤 변수이다. 여기서 X 는 정규 분포를 갖는 랜덤 변수이다. 채널의 페이딩은 주파수 비 선택적 페이딩을 가정한다.

하나의 노드에 미치는 총 간섭 I_A 는 CSMA에 의해 결정되는 전체 동시 노드 세트 Π_T 와 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_A = \sum_{i \in \Pi_T} W_i g(d_i) p \quad (3)$$

III. 총 간섭 모델을 이용한 반송파 감지 반경의 반복적 근사 기법

3.1 반송파 감지에 따른 전송 노드 밀도의 변화

CSMA 네트워크에서 전송 노드의 밀도는 노드의 전송 여부를 판단하는 반송파 감지와 밀접한 관련이 있다. 반송파 감지는 식 (1)에서 설명한 바와 같이 채널에 흐르는 간섭 신호를 측정하고 이를 임계치와 비교한 뒤 전송 여부를 결정하기 때문이다. 그러나 네트워크 통계 분석과 관련된 대부분의 연구에서는 이러한 복잡한 상호 작용 과정을 단순화하기 위해 반송파 감지 반경을 사용하며, 이 값은 주로 네트워크 내의 간섭효과에 대한 고려 없이 고정된 크기의 반경을 가정하거나, 단일 노드의 전송만을 고려한 아래의 식과

같은 형태로 정의한다.

$$R_{cs} = \left(\frac{p}{I_{cs}} \right)^{1/\alpha} \quad (4)$$

본 논문에서는 식 (4)로 표현되는 반송과 감지 반경을 프로토콜 반송과 감지 반경이라 하고, 이와 대비되는 개념으로 전체 네트워크에서 발생하는 간섭효과를 고려한 반송과 감지 반경을 물리 반송과 감지 반경이라 칭한다.

CSMA 네트워크의 동시 전송 노드 세트는 노드의 전송 여부가 CSMA의 동작 특성인 백오프와 반송과 감지와 같은 주변 노드와의 관계에 의해 결정되기 때문에 이를 확률적인 모델로 예측하기 어렵다. 이러한 문제는 총 간섭 모델과 같은 네트워크의 통계적 분석을 어렵게 하거나 분석 결과의 오차를 증가시킨다. 현재까지 CSMA 네트워크의 통계적 분석을 위한 동시 전송 노드 세트의 확률적 모델은 주로 Matern-Hardcore 점 과정을 이용하여 분석되는데^[11], MH 과정 Φ_{mh} 는 포아송 (Poisson) 점 과정 Φ 의 의존적 간략화 (dependent thinning)로 이전 삭제 결과에 따라 점의 삭제 또는 보류를 결정하는 과정이다. MH 과정의 수학적 표현은 다음과 같다^[12].

$$\Phi_{mh} = \left\{ x \in \Phi : m(x) < m(y), \right. \\ \left. \text{for all } y \in \Phi \cup C(x, d_{\min}) \right\} \quad (5)$$

여기서 포아송 점 과정 Φ 에 속한 모든 점 x 에 (0,1) 사이의 균일한 무작위 표시 값 $m(x)$ 할당된다. $C(x, d_{\min})$ 은 x 을 원점으로 하는 반경 d_{\min} 의 원이다. 식 (5)는 x 의 표시 값이 주변 $C(x, d_{\min})$ 내에 다른 모든 점들의 표시 값보다 작은 경우 x 는 MH 점 과정 Φ_{mh} 에 포함되어, CSMA의 백오프타이머의 동작을 모사한다.

MH 과정 적용 후 살아남은 남은 노드들의 밀도는 초기 배치된 전체 노드 밀도 λ 중 반송과 감지 반경 R_{cs} 에 의해 전송 기회를 얻은 동시 전송 노드 밀도 λ_T 로 다음의 식으로 표현된다^[12].

$$\lambda_T = \frac{1 - \exp(-\lambda \pi R_{cs}^2)}{\pi R_{cs}^2} \quad (6)$$

식 (6)에서 보는 바와 같이 R_{cs} 은 동시 전송 밀도

를 결정하는 중요한 이므로 이를 이용하여 유도한 통계적 모델의 정확성은 R_{cs} 값의 정확성에 큰 영향을 받게 된다. 따라서 식 (4)와 같은 단순한 가정으로부터 얻어진 R_{cs} 를 식 (6)에 적용하는 것은 CSMA를 적용한 노드의 전송 여부가 단일 노드로부터의 영향만을 고려하게 되므로 상당한 분석 오류를 포함할 것이다.

노드는 채널에서 감지한 총 간섭 신호의 크기 I_A 가 반송과 감지 임계치 I_{cs} 보다 작으면 전송을 시작한다. 따라서 채널 감지 결과에 따른 노드의 전송 여부를 I_T 라 하고, 이 값이 1인 경우 전송하고, 0인 경우 백오프한다고 할 때, I_T 는 다음과 같이 정의된다.

$$I_T = \begin{cases} 1, & \text{if } I_A \leq I_{cs} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

변적 A 의 크기를 갖는 네트워크에서의 전송 결정 평균을 $E[I_T]$ 라 할 때, 네트워크에 배치된 노드 밀도를 이용하여 평균적인 동시 전송 노드 수 N_T 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$N_T = E[n_T] = A \lambda E[I_T] \quad (8)$$

여기서 $n_T = |\Pi_T|$ 로 동시 전송 노드 세트에 포함된 노드의 수를 나타낸다.

그러나 식 (8)에서 보는 바와 같이 I_T 는 이렇게 결정된 동시 전송 노드의 수에 좌우되는 총 간섭 I_A 에 따라 달라지기 때문에, t 시점에 결정된 동시 전송 노드의 수 $n_T(t)$ 는 다음 시점의 동시 전송 노드 수 $n_T(t+1)$ 에 영향을 미친다. 따라서 동시 전송 노드 수와 총 간섭 사이의 관계는 다음의 두 식으로 표현될 수 있다.

$$\Pi_T(t+1) = \begin{cases} \Pi_T(t) \cup \{k\}, & \text{if } I_A \leq I_{cs} \\ \Pi_T(t) \setminus \{k\}, & \text{if } I_A > I_{cs} \end{cases} \quad (9)$$

여기서 $\Pi_T \cup \{k\}$ 는 집합 Π_T 에 k 를 추가하는 것이고, $\Pi_T \setminus \{k\}$ 는 Π_T 에서 k 를 제거한다.

식 (9)에 나타난 것과 같이 t 시점의 총 간섭이 I_{cs} 보다 작은 경우, $t+1$ 에서 동시 전송 노드의 수는 증가하게 된다. 이와 반대로, I_A 가 I_{cs} 작거나 $t+1$ 에 동시 전송 노드의 수 증가에 의해 I_A 가 다시 증가하는 경우, 이에 영향을 받는 노드들이 백오프 상태로 진입

하며 전송을 포기하게 될 것이다. 이러한 노드의 반복적인 상태 전이는 결국 총 간섭이 반송과 감지 임계치와 같은 값이 되도록 하는 동시 전송 노드 수 값에서 평형 상태를 이루게 될 것이다. 즉, 동시 전송 노드의 수는 I_A 가 I_{cs} 로 근접해감에 따라 평균 동시 전송 노드 수로 수렴하므로, 이 값에서 얻어지는 평균적인 R_{cs} 값을 찾아낼 수 있다.

$$n_T(t) \rightarrow N_T \text{ and } I_A \rightarrow I_{cs} \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (10)$$

그림 2에서 보는 바와 같이 I_{cs} 를 중심으로 네트워크에서 발생하는 총 간섭의 분포가 우측으로 치우치는 경우, 즉, I_A 의 분포가 I_{cs} 보다 높은 값에 많은 빈도를 가지는 경우, 반송과 감지 단계에서 현재 채널이 사용 중인 것으로 감지하여 자신의 전송을 보류하는 노드들의 수가 증가되게 되어, 결국 다음 단계에서는 동시 전송 노드의 수가 줄어들어 총 간섭이 감소하게 된다. 반면 이러한 과정이 I_A 의 분포를 I_{cs} 의 좌측으로 치우치게 만든다면, 더 많은 노드가 다음단계에서 전송 기회를 얻게 될 것이다. 따라서 평균적인 관점에서 네트워크 내의 동시 전송 노드의 수는 I_A 가 I_{cs} 와 동일해지는 지점으로 수렴하게 된다.

3.2 반송과 감지 반경의 반복적 근사

CSMA를 사용하는 네트워크의 다양한 통계적 특성을 분석하기 위한 첫 단계로 반송과 감지 반경 R_{cs} 의 보다 정확한 값의 도출은 매우 중요하다. 앞서 설명한 바와 같이 I_A 와 I_{cs} 는 밀접한 관계를 가지며, 이 값은 네트워크 내에서 동시 전송하는 노드의 수에 의해 결정되는 값이므로 I_A 를 이용하여 평균적인 R_{cs} 를

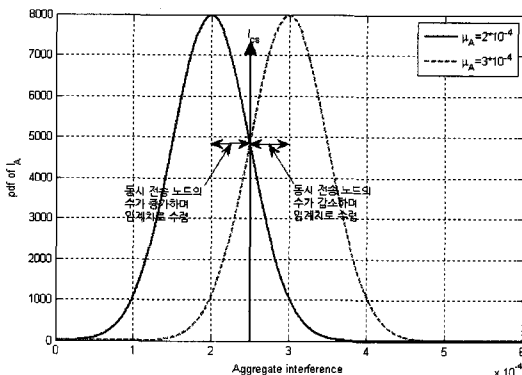


그림 2. 동시 전송 노드 밀도 평형 상태를 위한 총 간섭 분포와 R_{cs} 변화

구할 수 있다. I_A 의 분포 함수를 유도하기 위해 네트워크의 중심에 하나의 노드에 미치는 총 간섭을 고려한다.

무작위로 분포된 무선 네트워크에서의 총 간섭의 확률밀도 함수는 간섭의 cumulant를 이용하여 유도할 수 있다. 랜덤 변수 X 의 특성 함수 (characteristic function)가 $\phi(\omega)$ 라고 할 때, n 번째 cumulant는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\kappa_n = \frac{1}{j^n} \left[\frac{\partial^n \ln \phi(\omega)}{\partial \omega^n} \right]_{\omega=0} \quad (11)$$

랜덤 변수의 cumulant는 동일 랜덤 변수의 모멘트와 밀접한 관련이 있기 때문에 cumulant를 통해 분포의 평균과 분산을 구할 수 있다. 첫 번째 cumulant는 분포의 평균과 동일하고 두 번째 cumulant는 분산과 동일한 값을 가진다. 즉, $\kappa_1 = \mu$ 이고 $\kappa_2 = \sigma^2$ 가 된다. 따라서 이러한 cumulant의 특성을 이용하여 총 간섭 모델을 유도할 수 있다.

무선 네트워크의 총 간섭은 식 (3)과 같이 표현되며, 무작위 배치된 네트워크의 총 간섭의 특성 함수 $\phi_{I_A}(\omega)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다^[9,13].

$$\begin{aligned} \phi_{I_A}(\omega) &= E[e^{j\omega I_A}] \\ &= e^{\left(2\pi\lambda E_{\text{ISI}} \int_{R_s}^{\infty} ((\exp(j\omega pr^{-\alpha}) - 1)r dr \right)} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)을 식 (11)에 대입하여 총 간섭의 cumulant를 구할 수 있다. 네트워크의 총 간섭의 확률밀도 함수는 lognormal 함수로 근사 시킬 수 있다^[13].

$$f_{I_A}(z) = \frac{1}{z \sqrt{\pi\sigma_A^2}} \exp \left[\frac{-(\ln z - \mu_A)^2}{2\sigma_A^2} \right] \quad (13)$$

여기서 lognormal 분포의 평균 μ_A 과 분산 σ_A 은 총 간섭의 cumulant와 모멘트가 같은 특성을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\kappa_1 = \exp(\mu_A + \sigma_A^2/2) \quad (14)$$

$$\kappa_2 = [\exp(\sigma_A^2) - 1] \exp(2\mu_A + \sigma_A^2) \quad (15)$$

앞서 설명한 바와 같이 반송파 감지 반경은 네트워크의 평형상태인 총 간섭이 I_{cs} 와 같아지는 동시 전송 노드 밀도가 되도록 하는 값으로 수렴하므로, 이러한 관계를 이용하여 다음의 식을 이용하여 R_{cs} 를 계산할 수 있다.

$$\mu_A = \frac{2\pi p \lambda_T}{\alpha - 2} R_{cs}^{2-\alpha} = I_{cs} \quad (16)$$

그러나 식 (16)는 식의 복잡도로 인해 R_{cs} 값을 산출하기 위한 폐쇄형 식으로 변환하기 어렵다. 따라서 앞서 설명한 바와 같이 I_A 와 동시 전송 노드 밀도를 결정하는 R_{cs} 는 상보적 관계를 이용한 반복적 근사적 방법을 이용한다.

초기 R_{cs} 값을 식 (4)을 통해 얻어진 프로토콜 감지 반경 값으로 시작하고, 이때의 동시 전송 노드 밀도 λ_T 를 식 (6)을 이용하여 구한다. 일단 λ_T 가 구해지면, 정해진 동시 전송 노드 밀도를 갖는 네트워크 환경에서 발생하는 총 간섭의 확률 값과 확률 밀도 함수를 식 (13)을 통해 얻을 수 있다. 여기서 얻어진 총 간섭의 평균 μ_A 이 I_{cs} 와 같은지 비교한다. 만일 두 값의 차가 허용 오차 범위인 δ_I 보다 작아지는 경우 반복을 중지하고 이 때 얻어진 R_{cs} 를 평균 반송파 감지 반경으로 결정한다. 그러나 허용 오차 범위 보다 크다면, I_{cs} 와 μ_A 의 값을 비교하여 다음 계산에서 μ 가 I_{cs} 에 근사되는 방향으로 수렴하도록 R_{cs} 를 Δr_{cs} 만큼 더하

거나 뺀다. R_{cs} 의 변경은 λ_T 값에 직접적인 영향을 미치므로, 이에 따라 μ_{I_i} 의 값도 변하게 된다. 이 반복 과정이 허용 오차 범위 내의 값 주변에서 진동하지 않고 안정적으로 수렴하도록 하기 위해 반복회수가 증가함에 따라 Δr_{cs} 값이 점차 작아지도록 하기 위한 반복 상수 값인 δ_k 를 곱한다. δ_k 의 값은 알고리즘의 수렴 속도에 영향을 미치며, k 에 대한 단조 감소 함수로 표현될 수 있다.

표 1은 R_{cs} 를 도출하기 위한 반복적 동작 알고리즘을 보여준다. 반복적 근사 알고리즘에 의해 R_{cs}^* 가 얻어지면, 그 값을 이용하여 식 (6)에 대입하여 동시 전송 노드 밀도를 계산하고 이를 식 (13)에 적용하여 총 간섭의 분포를 구할 수 있다.

IV. 모의실험 및 결과

본 논문에서 제안한 네트워크에서 발생하는 총 간섭과 반송파 감지 임계치를 고려한 R_{cs} 갱신 알고리즘의 적합성을 평가하기 위해 다양한 모의실험을 수행하였다. 실험을 위해 면의 길이가 300m인 정사각형 2차원 평면에 노드 밀도를 0.01로 하여 무작위로 배치하였다. 로그 노말 페이딩의 분산은 6dB로 하였으며, 경로 손실 지수 α 는 값에 따라 반송파 감지 반경의 변화를 관찰하기 위해 2.3 ~ 6의 범위에서 선택하였다. 각 노드의 전송 전력을 1 또는 2로 설정하였으며, 노드의 반송파 감지 임계치는 1.0×10^{-3} 으로 고정하였다.

우선 반송파 감지 반경의 방식에 따라 총 간섭의 확률밀도 함수가 어떻게 변화하는지를 관찰하기 위해 α 가 3인 채널에서 프로토콜 R_{cs} 와 물리 R_{cs} 를 식 (4)와 제안된 알고리즘을 이용하여 구한 값을 이용하여 그림 3에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 채널의 경로 손실이 낮아 간섭효과가 큰 경우 총 간섭에 의해 전송이 금지되는 노드가 증가하게 되고, 이는 프로토콜 R_{cs} 에 비해 더 넓은 반경이 필요함을 나타낸다. 더 넓어진 감지 반경에 의해 전송 노드의 밀도가 낮아지기 때문에 물리 감지 반경을 적용한 경우 밀도 함수가 좌측으로 이동하여 평균 간섭량이 줄어들음을 알 수 있다.

제안된 알고리즘의 적합성 확인을 위한 모의실험을 수행을 위해 식 (5)에 주어진 MH 점과정을 이용하여 시뮬레이터를 구현하였다. 시뮬레이터는 MH 과정 적용 후 전송 가능 상태로 확인된 노드들 간의 간섭효과를 고려하기 위해 전송 가능 상태의 노드에 대한 주변

표 1. 총 간섭 기반 R_{cs} 갱신 알고리즘

<p>Init: $R_{cs}(0) := (ps/I_{cs})^{1/\alpha}$ $k := 0$</p> <p>Do: Calculate λ_T Calculate μ_A using λ_T if $\mu_A - I_{cs} < \delta_I$ goto Finish: if $\mu_A > I_{cs}$ $R_{cs}(k+1) = R_{cs}(k) + \Delta r_{cs}$ else $R_{cs}(k+1) = R_{cs}(k) - \Delta r_{cs}$ $k = k + 1$ $\Delta r_{cs} = \delta_k \Delta r_{cs}$</p> <p>Finish: $R_{cs}^* = R_{cs}(k)$ find $f_I(z)$ with R_{cs}^*</p>
--

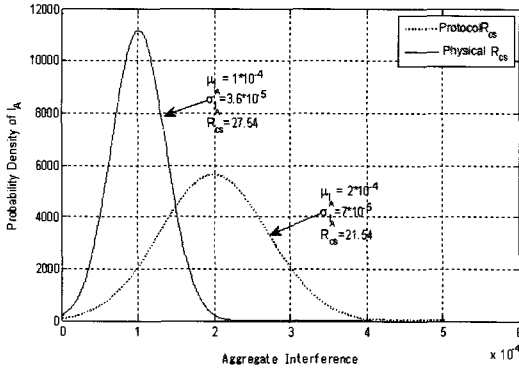


그림 3. 반송과 감지 반경 계산 접근 방식에 따른 총 간섭 분포 곡선 ($\alpha=3$)

으로부터의 총 간섭을 계산하고 이 값이 임계치보다 높은 경우 CSMA에 의해 백오프되는 상황을 반영하였다. 전송 가능 상태에서 다시 백오프되는 단말을 재 스케줄링 과정에 있다고 정의하였다.

그림 4는 반송과 반지 감지 반경에 따른 재 스케줄링 되는 노드의 비율을 측정된 그래프이다. 결과에서와 같이 프로토콜 감지 반경 ($PROT-R_{cs}$)을 적용한 경우가 물리 감지 반경 ($PHY-R_{cs}$)을 적용한 경우에 비해 더 많은 노드가 재 스케줄링 상태가 되는 것을 알 수 있는데, 이것은 많은 노드가 전송 불가 상태에 있음에도 전송 가능한 상태로 통계적 분석에 이용되어 오류를 유발하고 있다는 것을 보여준다. 작은 α 의 영역에서의 간섭효과가 더 크지만 반송과 감지 반경이 증가로 제한된 네트워크에 영역에서의 동시 전송 노드의 절대수가 α 가 큰 영역에 비해 작기 때문에 프로토콜 R_{cs} 에 의한 재 스케줄링되는 노드의 수가 α 가 3.2인 부근에서 많이 나타나는 것처럼 나타났다. 반면, α 가 4.8이상인 부분에서는 점차 모든 방식이 유사 값으로 수렴하는데, 이는 간섭효과가 줄어들어

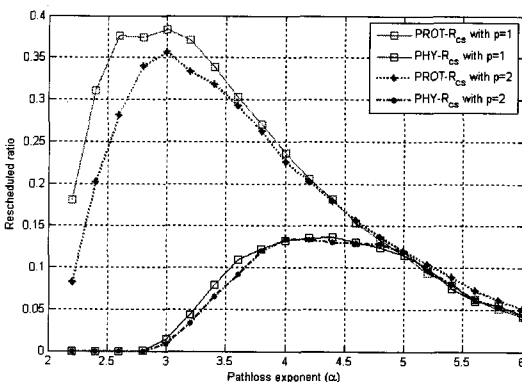


그림 4. 반송과 감지 반경 방식에 따른 재 스케줄링 비율

감지 반경이 유사한 값을 가지기 때문이다. 전송 전력에 대해서도 제안된 알고리즘을 사용하는 경우 전송 전력 변화에 대해 일정한 재 스케줄링 비율을 가지며 더 안정적인 결과를 보였다.

그림 5는 시뮬레이터를 통해 측정된 평균 반송과 감지 반경, 프로토콜 반경, 그리고 제안된 물리 반경의 값을 비교하였다. 결과에서 보는 바와 같이 α 가 작아서 간섭효과가 큰 경우, 프로토콜 반경은 간섭효과를 반영하지 못 하기 때문에 물리 반경에 비해 훨씬 작은 반경 값을 갖게 되고, 이는 임계치 이상의 간섭을 받는 일부 노드가 전송을 할 수 있는 상태에 있는 것처럼 보이게 한다. 또한, 제안된 방식이 측정된 평균 반경 값과 유사한 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 6은 각 방식에 대한 네트워크 중심에서의 평균 총 간섭을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 간섭효과가 커지는 작은 α 값 영역에서 평균 간섭량의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 간섭효과가 큰 경우 제안된 방식은 간섭효과에 의해 재 스케줄링 상태, 즉

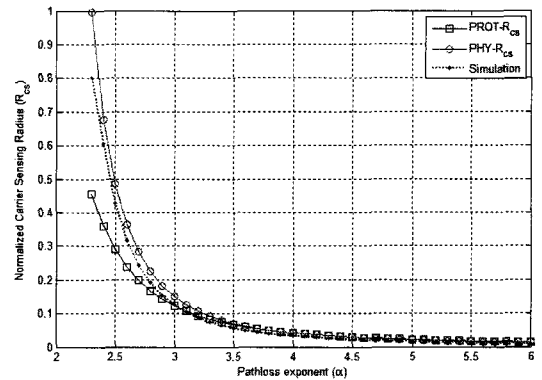


그림 5. 경로 손실 지수에 따른 반송과 감지 반경 방식 비교

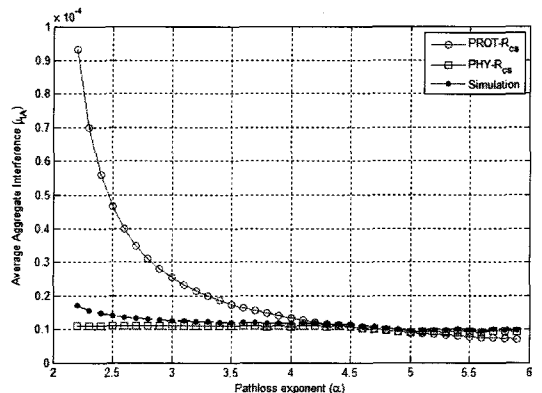


그림 6. 경로 손실 지수에 따른 반송과 감지 반경 방식별 평균 총 간섭량 비교

백오프되는 노드의 수를 잘 반영하고 있으나, 기존 방식인 프로토콜 변경의 경우 이를 반영하지 못해 보다 많은 노드가 전송 가능 상태가 되어 전체 네트워크의 간섭량을 과도하게 표현하고 있음을 알 수 있다. 결과 그림에서 작은 α 의 영역에서의 시뮬레이터 측정값과 제안된 방식의 평균 총 간섭의 오차가 다른 α 영역에 비해 크게 나타나는데, 이는 실험환경에서 네트워크의 경계에 위치한 노드가 다른 노드들에 비해 간섭효과를 적게 받아 전송 상태로 선택되어, 전체적으로 노드의 수가 다소 증가하기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 대규모 네트워크의 통계적 분석에 사용되는 프로토콜 모델 기반의 반송파 감지 환경이 노드 간의 간섭효과와 같은 네트워크의 동적 특성을 반영하지 못 함으로써 발생하는 오류를 해결하고자, 총 간섭 통계 모델에 기초한 물리 반송파 감지 환경을 유도하는 알고리즘을 제안하였다. CSMA 노드의 전송 판단 메커니즘과 네트워크에 존재하는 노드 간 간섭효과와의 상호작용 특성을 분석하여, 총 간섭 모델과의 물리 반송파 감지 환경과의 연관성을 규명하였다. 분석 결과를 토대로 총 간섭 통계 모델을 이용하여 물리 반송파 감지 환경을 유도하는 반복적 근사 알고리즘을 제안하였으며, 제안된 알고리즘의 적합성을 판단하고자 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과는 프로토콜 기반의 반송파 감지 환경은 채널 상태의 변화와 같은 네트워크의 동적 변화를 반영하지 못 하는 단점이 있음을 보였으며, 반면 제안된 알고리즘은 네트워크의 통계적 분석의 정확성을 높이는데 기여함을 보였다.

참고 문헌

[1] A. Busson, G. Chelius, and J.-M. Gorce, "Interference modeling in CSMA multi-hop wireless networks," INRIA, France, Tech. Rep.6624, 2009.

[2] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless network," *IEEE trans. Info. theory*, 46(3), pp.388-404, 2000.

[3] P. Santi, "Topology control in wireless ad hoc and sensor networks," *ACM Computing Surveys*, 37(2), pp.164-194, 2005.

[4] T. ElBatt and A. Ephremides, "Joint scheduling

and power control for wireless ad hoc networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 3(1), pp.74-85, 2004.

[5] J. Hwang and S.-L. Kim, "Cross-layer optimization and network coding in csma/ca-based wireless multihop networks," *IEEE/ACM trans. Networks*, 19(4), pp.1028-1042, 2011.

[6] A. Ghasemi, and E. S. Sousa, "Interference aggregation in spectrum-sensing cognitive wireless networks," *IEEE J. Sel. Topics Signal Processing*, 2(1), pp.41-56, 2008.

[7] A. Ghasemi, "Interference characteristics in power-controlled cognitive radio networks," in Proc. *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, 2011.

[8] K. W. Sung, M. Tercero, and J. Zander, "Aggregate interference in secondary access with interference protection," *IEEE Comm. Letters*, 15(6), pp.629-631, 2011.

[9] Z. Chen, C.-X. Wang, X. Hong, J. Thompson, S. A. Vorobyov, and X. Ge, "Interference modeling for cognitive radio networks with power or contention control," in Proc. *WCNC*, 2010.

[10] M. Aljuaid and H. Yanikomeroglu, "A cumulant-based characterization of the aggregate interference power in wireless networks," in Proc. *IEEE VTC2008-Fall*, 2008.

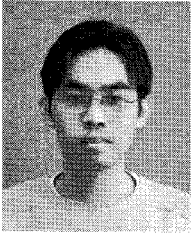
[11] H. Q. Nguyen, F. Baccelli, and D. Kofman, "A stochastic geometry analysis of dense IEEE 802.11 networks," *IEEE INFOCOM*, 2007.

[12] D. Stoyan, W. S. Kendall, and J. Mecke, *Stochastic Geometry and Its Applications*, Chichester: John Wiley & Sons, 1986.

[13] E. S. Sousa and J. A. Silvester, "Optimum transmission ranges in a direct-sequence spread-spectrum multihop packet radio network," *IEEE J. Sel. Area Commun.*, 8(5), pp. 762-771, 1990.

설 재 영 (Jae Young Seol)

정회원



1998년 2월 건국대학교 전자공학과

2000년 2월 연세대학교 전기전자공학과 석사

2008년 9월~현재 연세대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> 인지 무선 통신 시스템, 제어 이동성, 무선 자원 관리

김 성 루 (Seong-Lyun Kim)

종신회원



1994년 8월 KAIST 공학박사

1994년~1998년 ETRI 이동통신기술연구단 선임연구원

1998년~2000년 스웨덴 KTH, Dept. Signals, Sensors & Systems 조교수

2000년~2004년 ICU 조교수, 부교수

2004년~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수, 교수

<관심분야> Radio resource management, information theory, robotic network, economics of wireless systems