

멀티 라디오 애드혹 네트워크에서의 멀티 채널을 이용한 모델 기반 레이트 분할 알고리즘

정회원 김 석 형*, 김 동 욱*, 종신회원 서 영 주**°, 정회원 권 동 희***

A Model-based Rate Separation Algorithm Using Multiple Channels in Multi-Radio Ad Hoc Networks

Sok-Hyong Kim*, Dong-Wook Kim* *Regular Members*,
Young-Joo Suh**° *Lifelong Member*, Dong-Hee Kwon*** *Regular Member*

요 약

IEEE 802.11 물리 (Physical) 계층과 MAC (Medium Access Control) 계층은 다수의 채널과 데이터 레이트를 제공한다. IEEE 802.11 멀티 라디오 애드혹 네트워크의 성능을 향상 시키기 위해서는 가용한 채널과 데이터 레이트를 효율적으로 할당해야 한다. 하지만, IEEE 802.11 멀티 레이트 네트워크에서는 낮은 레이트 링크가 높은 레이트 링크에 영향을 미쳐서 네트워크 성능을 심각히 저하시키는 문제인, RA (Rate Anomaly)가 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 다른 데이터 레이트를 사용하는 링크들을 멀티 채널로 분할시킴으로써 이러한 RA 문제를 완화하는 모델 기반 레이트 분할 (Model-based Rate Separation, MRS) 알고리즘을 제안한다. MRS 알고리즘은 IEEE 802.11 싱글 홉 (single-hop) 네트워크의 성능을 측정하는 기존의 성능 모델을 활용하여 낮은 레이트 링크와 높은 레이트 링크를 분산시킨다. 시뮬레이션을 통해 멀티 라디오 애드혹 네트워크에서 MRS 알고리즘이 기존 알고리즘들에 비해 향상된 네트워크 성능을 나타냄을 확인하였다.

Key Words : channel assignment, IEEE 802.11, multi-channel, multi-rate, rate anomaly

ABSTRACT

IEEE 802.11 PHY and MAC layer provide multiple channels and data rates. To improve the performance of IEEE 802.11 multi-radio ad hoc networks, it is required to utilize available channels and data rates efficiently. However, in IEEE 802.11 multi-rate networks, the rate anomaly (RA) problem occurs that the network performance is severely degraded as low-rate links affect high-rate links. Hence, in this paper, we propose a model-based rate separation (MRS) algorithm that uses multiple channels to separate different data rate links so that the RA problem is mitigated. MRS algorithm utilizes an existing throughput model that estimates the throughput of IEEE 802.11 single-hop networks to separate low-rate links and high-rate links. Through simulations, we demonstrate that the MRS algorithm shows improved network performance compared with existing algorithms in multi-radio ad hoc networks.

※ 본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원 (2010-0024938), 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2010-C1090-1031-0009).

* 포항공과대학교 컴퓨터공학과 모바일 네트워킹 연구실 ({shkimm, shkim80}@postech.ac.kr)

** 포항공과대학교 정보전자융합공학부(yjsuh@postech.ac.kr), (° : 교신저자), *** SK 텔레콤(donghee.kwon@sk.com)

논문번호 : KICS2010-09-447, 접수일자 : 2010년 9월 13일, 최종논문접수일자 : 2010년 12월 30일

I. 서 론

IEEE 802.11에 기반한 무선 네트워크가 활발히 사용되면서 장소에 구애 받지 않고 인터넷을 접속하려는 사용자가 급격히 증가되었다. IEEE 802.11은 무선 네트워크를 설치하는데 있어서 유연성, 저비용, 자가 구성 등과 같은 장점들을 제공한다. 이러한 IEEE 802.11 무선 네트워크를 구성할 때 가장 큰 문제점 중의 하나는 네트워크 성능이다. 멀티 채널 기법은 이러한 네트워크 성능을 향상시키기 위한 유용한 해결책 중의 하나이다.

멀티 채널 멀티 라디오 무선 네트워크에서는 노드가 하나 이상의 IEEE 802.11 NIC (Network Interface Card)를 장착할 수 있다. 두 개의 인접한 노드가 같은 채널에서 동작할 때, 하나의 무선 링크를 형성하게 된다. 일반적으로 네트워크에 많은 수의 노드가 존재하므로 많은 수의 무선 링크가 형성될 것이다. 하지만, IEEE 802.11 표준이 제공하는 멀티 채널 개수는 한정되어 있다. 따라서, 이러한 무선 링크들 중에 어떤 링크들은 같은 채널을 공유해야 되고 결국 동시 전송이 불가능하게 되어 전체적인 네트워크 성능이 저하된다. 이를 해결하기 위해 다양한 멀티 채널 프로토콜이 제안되었다¹⁻⁴⁾.

멀티 채널에 더하여, IEEE 802.11은 멀티 레이트를 제공한다. 예를 들어, IEEE 802.11a는 6Mbps에서 54Mbps까지의 데이터 레이트를 제공한다. 노드의 이동이 거의 없는 정적인 네트워크 환경에서는 두 노드 사이의 거리에 따라 데이터 레이트가 결정된다. 즉, 두 노드 사이의 거리가 멀수록 낮은 데이터 레이트가 사용된다. 일반적으로 무선 네트워크에 존재하는 무선 링크들은 서로 다른 데이터 레이트를 사용할 것이다. 따라서, 이러한 무선 링크들은 같은 채널에서 서로 다른 데이터 레이트를 사용하게 되는데, 이는 RA (Rate Anomaly)라는 현상을 야기한다. RA문제는 낮은 레이트 링크가 높은 레이트 링크의 성능을 급격하게 저하시키는 문제이다⁵⁾. 이를 해결하기 위해 다양한 기법이 제안되었다⁶⁻⁹⁾.

본 논문에서는 IEEE 802.11 애드혹 네트워크에서 일어날 수 있는 RA문제를 완화하기 위해 모델 기반 레이트 분할 (Model-based Rate Separation, MRS) 알고리즘을 제안한다. MRS는 IEEE 802.11 싱글 홉 네트워크의 성능을 측정하는 모델과 가용한 멀티 채널을 사용하여 낮은 레이트 링크와 높은 레이트 링크를 분할시킨다. 이러한 방식은 다음과 같은 특징이 있다. (i) 서로 다른 데이터 레이트를 사용하는 링크들을

다른 채널로 분할시켜서 RA문제를 완화한다. (ii) 단순히 채널을 할당하는 방식이므로 IEEE 802.11 표준을 수정할 필요가 없다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 MRS 알고리즘의 성능이 기존 기법에 비해 향상된 성능을 보임을 입증한다.

논문 구성은 아래와 같다. 먼저, 2장에서 관련 연구들을 살펴보고, 3장에서 MRS 알고리즘을 제안하게 된 동기를 살펴본다. 4장에서 제안하는 MRS 알고리즘을 자세히 설명한 뒤, 5장에서 시뮬레이션을 통해 MRS알고리즘의 성능을 검증하고, 6장에서 논문을 마무리한다.

II. 관련 연구

멀티 채널을 활용하여 네트워크 성능을 향상시키기 위한 다양한 채널 할당 기법들이 제안되었다. 이러한 기법들은 크게 분산적인 (distributed) 채널할당과 중앙 집중적인 (centralized) 채널할당으로 나눌 수 있다. 분산적인 채널 할당 방법은 노드가 주변에 인접한 노드들로부터 채널 할당을 위한 정보를 수집하고 자신의 가용한 인터페이스에 채널을 할당한다. 예를 들어, Hyacinth¹⁾와 ROMA²⁾는 무선 메쉬 네트워크를 위해 제안되었으며, 메쉬 네트워크에서의 게이트웨이를 최상위 노드로 하여 트리를 구성한다. 각 노드는 두 개의 NIC을 사용하는데, 하나의 NIC은 트리 상의 부모 노드와 통신하기 위해 사용하고, 다른 하나의 NIC은 자식 노드들과 통신하기 위해 사용한다. 중앙 집중적인 채널 할당 방법은 특정 노드가 네트워크에 존재하는 모든 무선 링크에 대한 정보를 수집하고, 최적화된 알고리즘을 수행한 뒤, 채널 할당 결과에 따라 링크의 채널을 할당한다. 예를 들어, FCRA³⁾와 TiMesh⁴⁾는 메쉬 네트워크의 채널 할당을 위해 선형 최적화 (Linear Optimization)을 활용하여, 최적화 알고리즘을 설계하였다. 이 알고리즘을 수행하여 네트워크에 존재하는 모든 링크의 채널을 할당한다.

이러한 채널 할당 기법들은 IEEE 802.11 네트워크에서 흔히 발생할 수 있는 RA문제를 전혀 고려하지 않았다. RA문제를 해결하기 위해 크게 싱글 채널 (single-channel) 기법⁶⁻⁷⁾과 멀티 채널 (multi-channel) 기법⁸⁻⁹⁾이 제안되었다. 싱글 채널 기법은 싱글 채널 네트워크를 가정한 기법으로써, 채널 할당은 수행하지 않고 IEEE 802.11의 채널 접근 파라미터 변경⁶⁾이나 트래픽 릴레이⁷⁾ 등과 같은 기법들이 제안되었다. 멀티 채널 기법은 멀티 채널 네트워크를 가정한 기법으로, IEEE 802.11의 파라미터는 수정하지 않고 채널

할당을 통해서 데이터 레이트를 분할시키는 기법이다.

본 논문의 관심은 이러한 멀티 채널 기법이며, 이에 대한 예로는 MRMC (Multi-Rate Multi-Channel)^[8]와 DR-CA (Data Rate adaptive Channel Assignment)^[9]가 있다. MRMC는 무선랜과 같은 싱글 홉 네트워크 환경을 가정하였다. 노드는 데이터 레이트마다 하나의 NIC을 장착하고 있고 각 NIC들은 서로 다른 채널을 사용한다. 이때, 각 링크는 데이터 레이트에 따라 NIC을 사용한다. 노드가 장착한 NIC개수가 데이터 레이트 개수보다 작다면, 가장 높은 데이터 레이트에 우선권이 있다. 즉, 각 노드가 2개의 NIC을 가지고 있다면, 54Mbps 링크는 NIC1을 사용하고, 나머지 48Mbps에서 6Mbps까지는 NIC2을 사용한다. DR-CA는 각 노드가 다수의 NIC을 가지고 있으며, 각 NIC은 서로 다른 채널을 사용한다. 이 때, DR-CA는 각 채널에 할당된 데이터 레이트의 합이 거의 균등하게 분산되도록 링크에 채널을 할당한다. 예로, 각 노드는 3개의 NIC을 가지고 있고, 4개의 링크가 각각 24Mbps, 18Mbps, 9Mbps, 6Mbps를 사용한다면 24Mbps링크는 NIC1, 18Mbps링크는 NIC2, 9Mbps 링크와 6Mbps링크는 NIC3을 사용한다.

하지만, 이러한 MRMC와 DR-CA는 아래와 같은 문제점을 갖는다. 첫째, MRMC는 경우에 따라 가용한 NIC을 사용하지 않을 수 있다. 예를 들어, 54Mbps는 NIC 1, 48Mbps는 NIC2, 36Mbps~ 6Mbps들은 NIC3으로 할당되었다고 가정하자. 이때, 48Mbps 링크가 없다면 NIC2는 사용되지 않는다는 문제점이 있다. 둘째, DR-CA는 링크의 데이터 레이트 정보만을 활용하여 레이트를 분할한다. IEEE 802.11네트워크의 성능을 측정할 수 있는 성능 모델을 활용한다면, 보다 향상된 레이트 분할을 수행할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이러한 사항들을 반영한 레이트 분할 알고리즘을 설계한다.

III. RA (Rate Anomaly) 문제

본 절에서는 제안하는 채널 할당 기법이 다루고자 하는 RA문제를 먼저 관찰하고, 이를 완화하기 위한 채널 할당 기법 디자인을 살펴보도록 한다.

그림 1을 사용하여 RA문제를 살펴보도록 한다. 그림 1에서 각 노드는 두 개의 IEEE 802.11a NIC을 가지고 있으며 사용 가능한 채널 개수는 2개이다. 화살표는 CBR (Constant Bit Rate) 트래픽 플로우 (flow)의 방향이고, 각 링크가 어떤 데이터 레이트를 사용하느냐에 따라 굵기가 다르다. 예를 들어, 링크A-B는

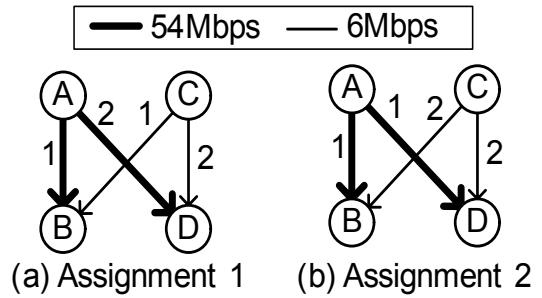


그림 1. 채널 할당 예제

54Mbps를 사용한다. 링크 위에 있는 숫자는 채널 번호이고, 노드들은 싱글 홉 내에서 직접 통신이 가능하다.

먼저, 그림 1(a)에서는 노드A와 C가 각각 노드 B와 D에게 54Mbps링크와 6Mbps링크를 통해서 채널 1과 2를 사용하여 포화된 (saturated) CBR 트래픽을 10초부터 발생시킨다. 이에 더하여, 노드 A와 C는 각각 노드 D와 B에게 54Mbps 링크와 6Mbps링크를 통해서 채널 2와 1을 사용하여 포화된 트래픽을 20초부터 발생시킨다.

그림 1(b)에서는 노드 A와 C가 노드 B와 D에게 54Mbps 링크와 6Mbps 링크를 통해서 채널 1과 2를 사용하여 포화된 트래픽을 10초부터 발생시킨다. 하지만, 이번에는 노드 A와 C는 각각 노드 D와 B에게 54Mbps 링크와 6Mbps링크를 통해서 채널 1과 2를 사용하여 20초부터 포화된 트래픽을 발생시킨다. 여기서, 포화된 각각의 CBR 트래픽의 전송율은 50Mbps이다. 따라서, 그림 1(a)에서는 다른 데이터 레이트를 사용하는 링크들이 같은 채널을 사용하고, 그림 1(b)에서는 같은 데이터 레이트를 사용하는 링크들이 같은 채널을 사용한다.

이러한 채널 할당들의 성능을 NS-2를 사용하여 측정해 보았다. IEEE 802.11a의 파라미터는 기본값을 사용하였다. 그림 2는 이에 대한 결과를 시간에 따라 보여주고 있다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 10초부터 20초까지는 채널할당 1 (Assignment 1)과 채널할당 2 (Assignment 2)의 성능이 약 23Mbps로 유지됨을 알 수 있다. 하지만, 20초부터는 채널할당 1의 성능이 15Mbps이하로 급격히 저하됨을 볼 수 있다. 이와 반대로, 채널할당2는 성능이 거의 동일하게 유지됨을 알 수 있다. 이를 통해 볼 때, 멀티 레이트 환경에서는 채널 할당을 어떻게 하느냐에 따라 네트워크 성능이 크게 달라질 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 채널할당2와 같이 서로 다른 레이트를 가지는 링크들을 다른 채널로 분할시키는 채널할당이 필요함을 알 수 있다.

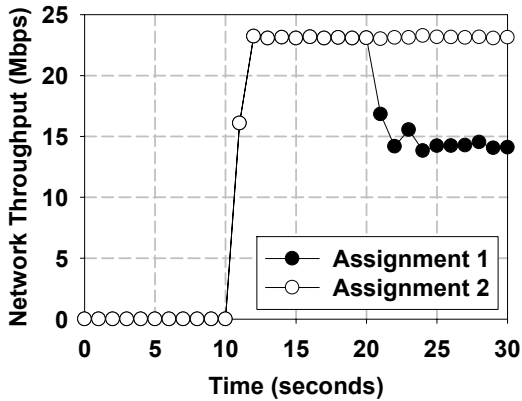


그림 2. 채널 할당1과 2의 네트워크 성능

IV. 모델 기반 레이트 분할 알고리즘

4.1 시스템 모델

모델 기반 레이트 분할 (Model-based Rate Separation, MRS) 알고리즘은 IEEE 802.11a 기반 멀티 라디오 싱글 홉 네트워크를 가정한다. 각 노드들은 다수의 IEEE 802.11a NIC을 가지고 있고, 임의의 두 노드는 싱글 홉 통신이 가능하다. IEEE 802.11a에 따라 겹치지 않는 채널 개수는 총 12개이고, 데이터 레이트는 6Mbps에서 54Mbps이다.

4.2 MRS 알고리즘 (단계1) - 링크 샘플링

MRS 알고리즘은 두 단계로 이루어져 있다. 첫 번째 단계는 “링크 샘플링”이다. 링크 샘플링은 네트워크의 모든 링크들에 채널할당 할 때, NIC의 “기준 링크”를 정하기 위한 단계이다. 즉, 각 노드가 가지고 있는 다수의 NIC의 기준이 되는 데이터 레이트 링크를 정하기 위한 것이다. 이 기준 링크를 바탕으로 두 번째 단계인 “레이트 분할 단계”에서는 각 링크의 최종 NIC (혹은 채널)이 결정된다.

먼저, 링크 샘플링 단계를 살펴보기로 한다. 알고리즘1은 링크 샘플링의 개략적인 코드를 보여주고 있다. 2번째 행에서는 변수들이 초기화 되고, 3번째 행에서는 모든 링크들이 “비할당(unassigned)” 상태로 설정된다. 4번째 행에서는 링크들을 데이터 레이트가 낮은 순으로 정렬한다. 이후에 샘플링 구간 (sample_int)를 결정하는데 이는 총 링크 개수를 각 노드의 NIC개수로 나눈 값이다. 예를 들어, 10개의 링크가 존재하고 각 노드는 2개의 NIC을 가지고 있다면 샘플링 구간은 5 (=10/2)가 된다. 6번째 행부터는 정렬된 링크들에 대해 각 샘플링 구간에 있는 링크들을 가용한 NIC의

알고리즘 1. 링크 샘플링 알고리즘

```

1: Link_Sampling_Algorithm () {
2:   sample_link = sample_int = curr_sample_idx = curr_nic = null;
3:   Set the status of all links to "unassigned";
4:   Sort every link in based on data rates in descending order;
5:   sample_int = No. of links / No. of NICs;
   /* Sample a link at the position of each sample interval */
6:   while (curr_sample_idx < No. of links) {
7:     sample_link = the link in curr_sample_idx of sorted link list;
8:     Assign sample_link to the base link of curr_nic;
9:     Set the status of sample_link to "assigned";
10:    curr_sample_idx += sample_interval;
11:    curr_nic++;
12:  }
13: }
    
```

기준 링크로 설정한다. 기준 링크가 된 링크는 “할당 (assigned)” 상태로 설정되고, 다음 NIC에 대해 동일한 과정을 반복한다.

그림 3은 링크 샘플링에 대한 예제를 보여준다. 각 노드는 2개의 NIC을 가지고 있고, 총 8개의 링크 (x1-x6)가 존재한다고 가정한다. 여기서 2개의 NIC은 각각 채널1과 2를 사용한다. 처음에 6개의 링크는 각 링크의 데이터 레이트에 따라 내림 차순으로 정렬된다. 그리고, 샘플링 구간은 3 (=6/2)이 된다. 링크 샘플링 알고리즘은 첫 번째 링크인 x1부터 샘플링을 수행하는데, 링크 x1는 NIC1의 기준 링크로써 NIC1에 할당된다. 그 다음 샘플링 구간에 있는 링크 x4는 NIC 2의 기준 링크로써 NIC2에 할당된다. 그 다음 샘플링 구간은 7인데 링크 x7은 없으므로 링크 샘플링 알고리즘은 종료한다.

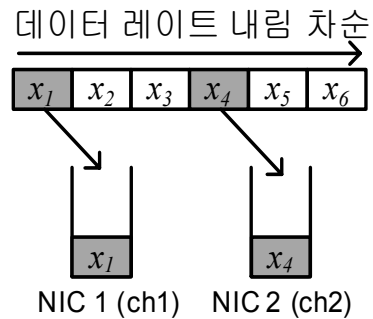


그림 3. 링크 샘플링 예제

4.3 성능 측정 모델

MRS 알고리즘의 두 번째 단계는 성능 측정 모델⁶⁾과 다음 절에서 설명하는 LE (Link Efficiency)를 사용한다. 먼저, 성능 측정 모델을 살펴보고자 한다. 이 성능 측정 모델은 IEEE 802.11 기반 싱글 홉 싱글 채널 네트워크의 성능을 정확히 측정한다. Markov 체인을 바탕으로 제안된 이 성능 측정 모델은 다음과 같은 네트워크 환경을 가정하였다. 각 노드는 움직임이 거

의 없으며 IEEE 802.11 NIC을 하나씩 가지고 있고, 항상 전송할 데이터 프레임 가지고 있다. 노드들은 전송할 때 사용하는 데이터 레이트에 따라 그룹화된다. 즉, 그룹 i 에 속한 노드는 데이터 레이트 r_i 를 사용하는 링크를 통해 전송한다. 여기서, i 는 1, 2, ..., R 이고, R 은 가능한 데이터 레이트 개수로써 IEEE 802.11a에서는 8이다. 이러한 IEEE 802.11기반 싱글 홉 싱글 채널 네트워크의 전체 처리율 (S)은 다음과 같다⁶⁾.

$$S = \sum_{i=1}^R (S_i \times r_i), \quad (1)$$

여기서, S_i 는 그룹 i 의 정규화된 처리율이다 (더 자세한 사항은 논문⁶⁾을 참고). 이 성능 모델은 논문⁶⁾에 따르면, 싱글 홉 네트워크에서 데이터 레이트 r_i 를 사용하는 노드 (혹은 링크) 개수 (n_i)를 입력으로 하는 함수이다. 즉, 채널 k 에서의 싱글 홉 싱글 채널 네트워크의 전체 처리율 (S_k)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S^k = f(n_1^k, n_2^k, \dots, n_R^k), \quad (2)$$

여기서, n_i^k 는 채널 k 에서 데이터 레이트 r_i 를 사용하는 링크 개수이다. 따라서, 네트워크에 K 개의 채널이 사용 가능할 경우의 전체 네트워크 처리율 (S_{total})은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$S_{total} = \sum_{k=1}^K S^k. \quad (3)$$

4.4 LE (Link Efficiency) 메트릭

본 절에서는 MRS알고리즘의 두 번째 단계에서 사용되는 LE (Link Efficiency) 메트릭을 살펴본다. 먼저, 그림 4를 살펴보자. 그림 4(a)는 노드 A, B, C, D가 싱글 홉 네트워크 상에 존재한다. 노드 A는 B에게 채널1에서 54Mbps 링크를 사용해서 전송하고, 노드 C는 같은 채널 1에서 6Mbps 링크를 사용해서 전송한다. 반면에, 그림 4(b)는 노드 A가 B에게 채널 1에서 54Mbps 링크를 사용해서 전송하고, 노드 C는 다른 채널 2에서 6Mbps 링크를 사용해서 전송한다. 이 두 경우를 살펴봤을 때, 그림 4(a)에서는 RA문제가 발생하여 54Mbps 링크의 성능이 급격히 떨어질 것이지만, 그림 4(b)에서는 54Mbps 링크와 6Mbps 링크가 서로

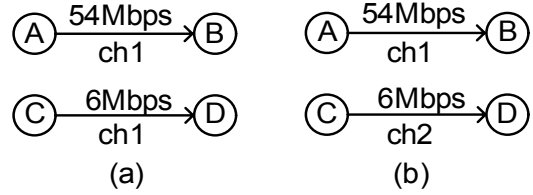


그림 4. LE 설명을 위한 예제

다른 채널을 사용하므로 링크의 데이터 레이트에 비례하여 성능이 달라질 것이다. 이때, 성능의 공평성 (fairness)를 살펴보면 그림 4(a)의 경우가 그림 4(b)의 경우보다 공평성이 떨어진다고 정의해야 한다. 이는 링크가 높은 데이터 레이트를 사용할수록 높은 성능을 가져야 하기 때문이다. 이를 반영하기 위해 r_i 를 사용하는 채널 k 상의 링크에 대해 LE (E_i^k)를 정의하였다.

$$E_i^k = S^k / r_i. \quad (4)$$

또한, 네트워크에 존재하는 링크들의 성능의 공평성 (F_N)을 반영하기 위해 LE를 Jain의 공평성 인덱스¹⁰⁾에 아래와 같이 적용하였다.

$$F_N = \left(\sum_{i=1}^{N_L} E_i^k \right)^2 / \left(N_L \cdot \sum_{i=1}^{N_L} (E_i^k)^2 \right). \quad (5)$$

여기서, N_L 은 총 링크의 개수이다. 수식 (5)에서 링크들의 LE의 공평성이 낮아질수록 F_N 값은 $1/N_L$ 에 가까워지고, 반대로 링크들의 LE의 공평성이 높아질수록 F_N 값은 1에 가까워진다.

4.5 MRS 알고리즘 (단계2) - 레이트 분할

본 절에서는 MRS알고리즘의 두 번째 단계인 레이트 분할 단계에 대해 설명한다. MRS알고리즘은 전체 네트워크 성능을 향상시키고, 링크의 성능 공평성을 향상하기 위해 LF (Link throughput and Fairness) 메트릭을 증가시키면서 채널을 할당한다.

$$LF = S_{total} \cdot F_N. \quad (6)$$

여기서, S_{total} 은 싱글 홉 멀티 레이트 네트워크의 성능을 정확히 측정하기 때문에 RA문제를 반영한다. 또한, F_N 은 링크들의 LE의 공평성을 반영한다. 따라서, LF메트릭 값을 증가시키는 것은 RA문제를 완화함과 동시에 네트워크의 성능을 높이고, 또한 링크들의 성

알고리즘 2. 레이트 분할 알고리즘

```

1: Rate_Separating_Algorithm () {
2:   curr_lf = new_lf = 0; max_lf_nic = null;
3:   for each "unassigned" link j do { /* Channel assignments */
4:     /* Find an interface with the highest LF value */
5:     for each interface k do {
6:       curr_lf = get_lf (); /* Compute the current LF value */
7:       Move the current link j to interface k temporarily;
8:       new_lf = get_lf (); /* Compute the new LF value */
9:       if (curr_lf < new_lf) then /* Check the LF value gain */
10:        max_lf_nic = k;
11:     }
12:     Remove the current link j from interface k;
13:   }
14:   Assign link j to NIC(max_lf_nic);
15: }
```

능 공평성도 향상시키는 결과를 낳는다.

알고리즘2는 레이트 분할 단계의 개략적인 코드를 나타낸다. 처음에 변수들은 초기화 되고, 3번째 행부터 아직 NIC이 할당되지 않은 링크에 대해서 채널 할당을 시작한다. (여기서, MRS알고리즘의 첫 번째 단계인 링크 샘플링에서 각 NIC의 기준 링크는 이미 NIC에 할당되었다.) 현재 링크를 가용한 각 NIC에 임시로 할당해 봄으로써 LF값이 가장 큰 NIC을 찾는다. 결국, 현재 링크는 LF값이 가장 큰 NIC에 최종적으로 할당되고, 모든 링크가 NIC에 할당되면 레이트 분할 단계는 종료된다.

그림 5는 그림 3의 링크 샘플링 단계 후의 레이트 분할 단계를 보여준다. 그림 3에서 설명했듯이, 링크 x1과 링크 x4는 각각 NIC1과 NIC2에 기준 링크로 이미 할당되었다. 이제, 남은 링크들을 LF값이 가장 큰 NIC에 차례대로 할당한다. 링크 x2를 NIC에 할당할 때, NIC1에 할당하는 것이 NIC2에 할당하는 것보다 LF메트릭 값이 크다면, 링크 x2는 NIC1에 할당된다. 이러한 두 단계의 MRS알고리즘 채널 할당 결과에 따라, 네트워크에 존재하는 모든 링크들의 채널이 결정된다.

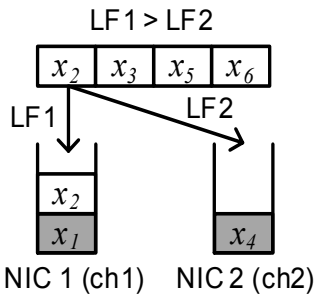


그림 5. 레이트 분할 예제

V. 성능평가

본 장에서는 MRS알고리즘의 성능을 NS-2^[11]를 사

용하여 검증하도록 한다. 비교 대상 기법은 MRMC^[8]와 DR-CA^[9]이다. 모든 실험 결과는 20번의 다른 시나리오들의 결과의 평균치이다. 그림 6과 같이 각 시나리오에는 30개의 노드들이 임의의 위치에 분포해 있고, 모두 싱글 홉 링크로 통신 가능하다. 또한, 30개 노드들의 위치가 시나리오마다 다르기 때문에 두 노드 간의 통신을 위한 링크의 데이터 레이트는 달라진다. 이 각 시나리오의 노드들은 같은 수의 IEEE 802.11a NIC을 가지며, 시나리오마다 2개에서 4개의 NIC을 가진다. 가용 채널 개수는 12개이고, 6Mbps에서 54Mbps까지의 총 8개의 데이터 레이트를 사용할 수 있다. 데이터 레이트를 위한 거리 설정은 Cisco Aironet 802.11a 카드의 데이터 시트를 참조하였다^[12]. IEEE 802.11 NIC의 파라미터는 NS-2의 기본값을 사용하였다. 각 시나리오의 실험 시간은 100초이다. CBR 트래픽을 사용하였으며, 패킷 크기는 1000 바이트이다. 각 플로우의 전송율은 50Mbps로 설정되어 포화되었고, 시나리오 마다 총 플로우 개수는 다르다. 각 플로우의 송신 노드와 수신 노드로 임의의 두 노드를 선택하였다. 표 1은 실험에 사용된 파라미터이다.

그림 7(a)는 플로우 개수에 따른 전체 처리율(aggregate throughput)을 보여준다. 각 시나리오에는 30개 노드들이 존재하고, 각 노드는 3개의 NIC을 사

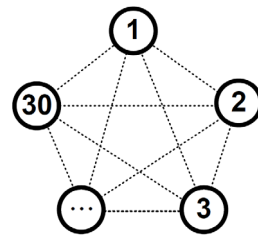


그림 6. 실험에 사용된 네트워크 모델

표 1. 실험 파라미터

파라미터	값
MAC	IEEE 802.11a
링크 데이터 레이트	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbps
트래픽	CBR 트래픽, 패킷 크기 1000 bytes
노드 개수	30
플로우 개수	5, 10, 15, 20, 25, 30
채널 개수	12 개
NIC 개수	2, 3, 4 개
전파 모델	Two-ray ground 전파 모델
실험 시간	100 초

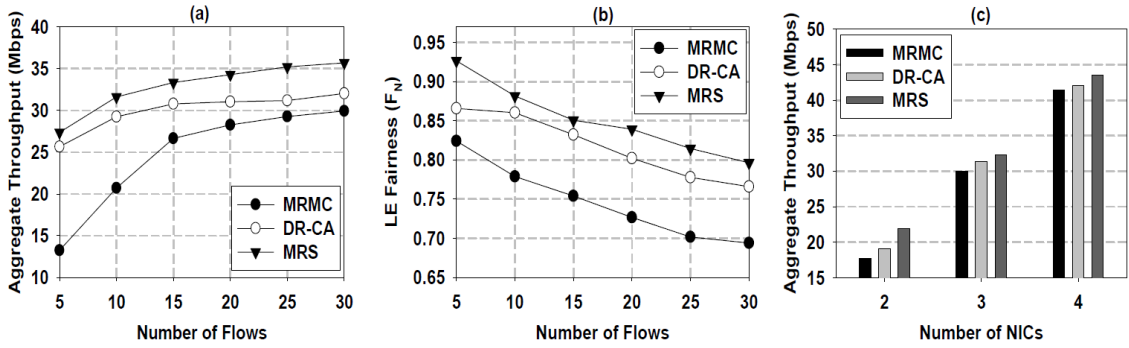


그림 7. MRS 알고리즘 성능 (a) 전체 처리율 (b) LE 공정성 (c) NIC 개수에 따른 성능

용한다. 그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 MRS의 성능이 DR-CA와 MRMC에 비해 향상됨을 볼 수 있다. 예를 들어, 플로우 개수가 30개일 때, MRS의 전체 처리율은 DR-CA와 MRMC에 비해 각각 11.5%, 19.3%의 높은 전체 처리율을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 성능 향상은 다음과 같이 설명될 수 있다. MRMC는 NIC개수가 3개일 때, 54Mbps는 NIC1에, 48Mbps는 NIC2에, 나머지 36Mbps~ 6Mbps는 NIC3에 할당한다. 플로우 개수가 작고 54Mbps링크나 48Mbps링크가 없을 경우, MRMC는 NIC1과 NIC2을 사용하지 않는다. 따라서, 플로우 개수가 작을 때, MRMC가 MRS와 DR-CA보다 매우 낮은 성능을 나타낸다. 하지만, MRS와 DR-CA는 이러한 문제를 완화한다. 또한, DR-CA는 링크의 데이터 레이트 정보만을 바탕으로 레이트를 분할시키지만, MRS는 성능 모델과 LE에 기반한 레이트 분할을 수행한다. 따라서, MRS가 DR-CA보다 향상된 성능을 나타냄을 알 수 있다.

다음으로, 링크들의 LE값의 공정성을 살펴보도록 한다. 그림 7(b)는 플로우 개수에 따른 수식 (5)의 F_N 값을 보여준다. 실험에 사용된 각 시나리오는 30개의 노드를 포함하며, 각 노드는 3개의 NIC을 사용한다. 그림 7(b)에서 볼 수 있듯이, MRS, DR-CA, MRMC의 F_N 값이 플로우 개수가 증가함에 따라 감소한다. 이는, 플로우 개수가 증가함에 따라 서로 다른 데이터 레이트를 사용하는 링크의 개수가 증가하기 때문이다. 하지만, 플로우 개수가 30개일 때, MRS의 F_N 성능이 DR-CA와 MRMC보다 4.1%, 14.8%정도 향상이 있음을 알 수 있다. 이는 MRS가 LE메트릭과 성능 모델 (S_{total})을 활용하여 링크의 성능 공정성을 향상시키도록 채널을 할당하기 때문이다. 또한, MRS와 DR-CA를 MRMC에 비교해봤을 때, MRMC의 F_N 값이 매우 낮음을 알 수 있다. 이는 NIC개수가 3개일 때, MRMC가 높은 레이트 링크인 54Mbps링크와

48Mbps링크는 다른 낮은 레이트 링크로부터 분리시키지만, 36Mbps에서 6Mbps를 사용하는 링크들은 RA문제로 인해 낮은 공정성을 가지기 때문이다.

그림 7(c)는 각 노드가 가지는 NIC개수에 따른 전체 처리율을 보여준다. 각 시나리오는 30개의 노드를 포함하고, 총 30개의 포화된 CBR 플로우가 생성되었다. 그림 7(c)에서 볼 수 있듯이, MRS의 성능이 NIC개수에 상관없이 DR-CA와 MRMC에 비해 높은 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.11 기반 애드혹 네트워크에서 흔히 발생할 수 있는 RA문제를 살펴보고, 이를 IEEE 802.11에서 제공하는 멀티 채널을 통해 완화하는 모델 기반 레이트 분할 (Model-based Rate Separation) 알고리즘을 제안하였다. MRS 알고리즘은 IEEE 802.11 싱글 홉 싱글 채널 네트워크의 성능을 측정하는 성능 모델과, 각 링크의 공정성을 반영하는 LE (Link Efficiency) 메트릭을 활용하여 낮은 레이트 링크와 높은 레이트 링크를 다른 채널로 분할시킴으로써, RA문제를 완화하였다. NS-2를 이용한 실험 결과를 통해서 MRS의 성능이 기존의 레이트 분할 채널 할당 알고리즘에 비해 향상된 성능을 나타냄을 검증하였다. 현재 MRS 알고리즘은 싱글 홉 네트워크를 가정하였기 때문에, 향후에는 MRS 알고리즘을 멀티 홉 (multi-hop) 네트워크에서도 적용할 수 있도록 확장할 계획이다.

참고 문헌

- [1] A. Raniwala and T. Chiueh, "Architecture and Algorithms for an IEEE 802.11-Based Multi-

Channel Wireless Mesh Network,” in Proc. of IEEE Infocom, 2005.

[2] A. Dhananjay, H. Zhang, J. Li, and L. Subramanian, “Practical, Distributed Channel Assignment and Routing in Dual-radio Mesh Networks,” in Proc. of ACM Sigcomm 2009.

[3] S. Avallone, I. F. Akyildiz, and G. Ventre, “A Channel and Rate Assignment Algorithm and a Layer-2.5 Forwarding Paradigm for Multi-Radio Wireless Mesh Networks”, IEEE/ACM Trans. Networking, Vol.17, No.1, pp.267-280, Feb. 2009.

[4] A.H.M. Rad and V. Wong, “Joint Logical Topology Design, Interface Assignment, Channel Allocation, and Routing for Multi-Channel Wireless Mesh Networks,” IEEE Trans. Wireless Comm., Vol.6, No.12, pp 4432-4440, Dec. 2007.

[5] M. Heusse, F. Rousseu, G. Berger-Sabbatel, and A. Duda, “Performance Anomaly of 802.11b,” in Proc. of IEEE Infocom, 2003.

[6] D.Y. Yang, T.J. Lee, K.H. Jang, J.B. Chang, and S. Choi, “Performance Enhancement of Multirate IEEE 802.11 WLANs with Geographically Scattered Stations,” IEEE Trans. Mobile Computing, Vol.5, No.7, pp.906-919, Jul. 2006.

[7] P. Bahl, R. Chandra, P. Lee, V. Misra, J. Padhye, D. Rubenstein, and Y. Yu, “Opportunistic Use of Client Repeaters to Improve Performance of WLANs, IEEE/ACM Trans. Networking, Vol.17, No.4, pp.1160-1171, Aug. 2009.

[8] T. Kuang, Q. Wu, and C. Williamson, “MRMC: A Multi-Rate Multi-Channel MAC Protocol for Multi-Radio Wireless LANs,” in Proc. of WiNCS, 2005.

[9] N. Niranjan, S. Pandey, and A. Ganz, “Design and Evaluation of Multichannel Multirate Wireless Networks,” ACM/Kluwer Mobile Networking and Applications, Vol.11, No.5, pp.697-709, Oct. 2006.

[10] R. Jain, W. Hawe, and D. Chiu, “A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer

Systems,” DEC Research Report DEC-TR-301, 1984.

[11] NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
 [12] Cisco Aironet, <http://www.cisco.com>

김 석 형 (Sok-Hyong Kim)

정회원



2005년 2월 한국항공대학교 정보통신공학과 학사
 2007년 2월 포항공과대학교 정보통신공학과 석사
 2007년 3월~현재 포항공과대학교 컴퓨터 공학과 박사과정
 <관심분야> 무선 메쉬 네트워크, 무선랜, 무선 네트워크

김 동 욱 (Dong-Wook Kim)

정회원



2005년 2월 경북대학교 컴퓨터공학과 학사
 2005년 3월~현재 포항공과대학교 컴퓨터 공학과 통합과정
 <관심분야> 무선랜, 무선 메쉬 네트워크, 무선 네트워크, 애드혹네트워크

서 영 주 (Young-Joo Suh)

중신회원



1985년 2월 한양대학교 전자공학과 학사
 1987년 2월 한양대학교 전자공학과 석사
 1996년 미국 조지아 공대 (Georgia Tech) 컴퓨터공학 박사

1988년~1990년 LG전자연구원

1990년~1993년 충청대학 교수

1996년~1997년 미국 Georgia Tech 연구원

1997년~1998년 미국 University of Michigan 연구원

1998년~현재 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수

<관심분야> 무선랜 프로토콜, 이동 IP, 이동 멀티캐스트, ad-hoc/sensor 네트워크, 차세대 이동 네트워크

권 동 희 (Dong-Hee Kwon)

정회원



1997년 2월 한국과학기술원 전
자공학과 학사.

2000년 2월 포항공과대학교 정
보통신공학과 석사.

2006년 2월 포항공과대학교 컴
퓨터공학과 박사.

2006년~2009년 POSDATA 연
구원

2010년~현재 SK 텔레콤 연구원

<관심분야> 무선 통신, 모바일 네트워크