

무선 메쉬 네트워크 소개: 링크간 관계 측정 및 처리율 분석을 중심으로

서울대학교 권태경* · 이정근 · 김원호 · 조대형

1. 메쉬 네트워크 개요

현재 무선 통신망 분야에서 최대의 화두는 무선 메쉬 네트워크이다. 사용자들에게 last mile 광대역 인터넷 서비스를 제공하기 위해서 가장 효율적인 솔루션 중의 하나로 생각되고 있다. 기존의 무선랜 서비스는 access point와 wireless station 이 하나의 무선 링크 환경에서 통신했으나, 메쉬 네트워크에서는 무선으로 동작하는 라우터(이하 메쉬 라우터)를 여러 번 거쳐서 유선 인터넷 망에 연결되기 때문에 많은 기술적인 문제점들이 있다.

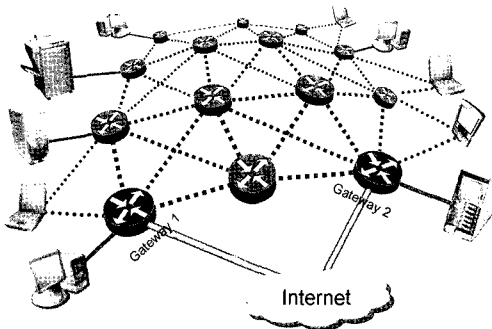


그림 1 메쉬 네트워크 구조

위의 그림에서 아래 쪽에 표시된 인터넷에 바로 연결된 두 개의 노드가 게이트웨이로서 메쉬라우터들과 인터넷을 연결하는 역할을 한다. 다른 원형의 노드들이 메쉬 라우터이고 일반 컴퓨터들은 편의상 가장자리에 표시되어 있다. 메쉬 라우터들은 다시 두 가지 유형으로 나뉘는데 첫째는 다른 메쉬 라우터들과만 통신하는 종류가 있고, 또 다른 하나는 다른 메쉬 라우터들 뿐만 아니라 일반 컴퓨터하고 통신하는 종류가 있다. 후자의 경우 mesh access point(MAP)라고도 한다. 일반적으로 MAP 들은 하나의 인터페이스(예, IEEE 802.11b/g)로 사용자들과 통신하고 또 다른 인터페이스(예, IEEE 802.11a 혹은 IEEE 802.16)로 다른

메쉬 라우터들과 통신하는 것이 일반적인 환경이다. 하나의 메쉬 네트워크에 게이트웨이는 그림에서와 같이 여러 개를 두는 것이 인터넷 서비스 가용성(availability) 측면에서 좋다.

본 논문 전반부에서는 무선 메쉬 네트워크의 특성, 응용 시나리오들을 간단히 소개한 후에 기술적인 이슈들을 설명한다. 본 논문의 후반부에서는 여러 기술적 문제점 중에 멀티 홉 무선 링크를 통해서 대역폭을 보장하는 연구주제에 조금 더 상세히 얘기하고자 한다. 이를 위해서는 근접한 무선 링크 들간의 carrier sensing과 interference 관계를 파악, 모델링, 분석하는 것이 핵심 기술이다.

1.1 메쉬 네트워크 특성

메쉬 네트워크는 크게 메쉬 라우터와 메쉬 클라이언트(mesh client)로 구성된다. 메쉬 클라이언트는 앞의 그림에서 일반 컴퓨터에 해당한다. 이 사용자 컴퓨터들은 메쉬 라우터 중의 하나를 무선랜의 access point로 생각하고 연결한다. 따라서 메쉬 클라이언트는 기술적으로 어려운 점이 없다. 단지 메쉬 네트워크 내에서 이동성 관리 등의 서비스를 특별히 요구한다면 메쉬 클라이언트도 약간의 추가되는 기능이 있을 수도 있다.

반면, 메쉬 라우터들은 self-configuration, self-healing 등의 기능들을 기본적으로 갖추어야 하고 멀티 홉 라우팅을 통해 유선 인터넷 노드(이하 게이트웨이)까지 패킷들을 전달해 주어야 하기 때문에 기존의 access point에 비해 많은 기능이 추가된다. 멀티 라디오 유닛을 가진 경우에는 더욱 메쉬 라우터가 복잡해 질 것이다.

그 외의 메쉬 네트워크의 다른 특성들은 다음과 같다. 첫째, 빠르고 사용자에게 편리한 메쉬 네트워크의 보급을 위해서는 기존의 IEEE 802.16, IEEE 802.11 등이 기술과 compatibility를 유지하는 것이 중요한 이슈가 된다. 둘째로는 무선 링크에서 나타나는

* 정회원

다양한 복잡한 현상들에도 불구하고 네트워크 성능(예, 처리율, 지연시간)을 어느 정도 보장해 주어야 한다. 무선 링크의 복잡한 현상의 대표적인 예는 packet 전송 에러의 이유가 다양하다는 것이다. 즉, 무선 링크 자체의 불안정성, 노드의 이동성, hidden node problem 등이 그것이다. 각각의 경우에 따라 서로 다른 프로토콜의 기법이 동작하여야 한다. 셋째로는 메쉬 네트워크 내의 트래픽과 메쉬 네트워크 외부의 트래픽을 다같이 잘 지원해야 되는 것이다. 특히 지역적인 정보들은 메쉬 네트워크 내부에서 peer-to-peer 등의 구조를 통해서 지원해 주는 것이 효율적이다. 그 밖에도 메쉬 클라이언트의 에너지 효율성, 이동성을 지원하는 것이 중요한 문제이다. 즉 메쉬 라우터들을 고정된 위치에서 동작하고 안정된 전원이 공급되는 환경이나 메쉬 클라이언트들은 배터리로 동작하는 환경을 고려해서 메쉬 네트워크 프로토콜 들을 설계해야 한다.

1.2 메쉬 네트워크 응용

메쉬 네트워크는 크게 다음과 같은 분야에서 사용될 것으로 전망되고 있다[1]. 먼저 last mile 광대역 인터넷 연결이다. 아직 인터넷 연결이 없는 곳에 유선으로만 광선로를 설치하는 것은 지역에 따라 비용이 클 수 있다. 이런 경우 메쉬 라우터들을 여러 군데에 설치하고 IEEE 802.11과 IEEE 802.16을 사용하여 낮은 비용으로 지역에 광대역 인터넷 서비스를 제공할 수 있다. 아래 표에서는 메쉬 네트워크와 다른 네트워크를 사용해서 광대역 인터넷 서비스를 제공할 때 기술적인 측면을 비교하고 있다.

	DSL	802.16	cellular	Mesh
대역폭	Very good	Very good	limited	good
초기비용	Very high	high	high	low
전체비용	Very high	high	high	moderate
coverage	good	moderate	good	moderate

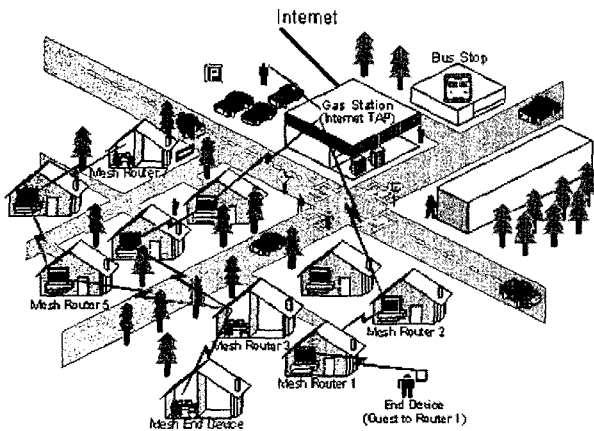


그림 2 community area network

비슷한 응용으로서 community area networking 이 있다. 이 경우에는 하나의 무선 라우터가 다운되거나 혼잡 상황일 발생하더라도 근처의 다른 무선 라우터를 이용해서 인터넷 서비스를 이용할 수 있는데 초점이 있다. 그림 2에서는 Microsoft에서 생각하는 community area에서 메쉬 네트워크를 설치할 때 가능한 시나리오를 보여 주고 있다. 많은 곳에서 메쉬 클라이언트는 하나 이상의 메쉬 라우터에 연결 가능하다.

요즘 가장 화두가 되는 응용은 metropolitan area network로서 메쉬 네트워크 솔루션이다. 도시 전체를 wireless mesh network을 통해서 인터넷 서비스하겠다는 것인데 대표적인 것으로는 미국 Urbana-Champaign 지역에서 2000년에 시작한 CuWin 프로젝트이다. 이 CuWin 망에서 대표적인 프로토콜은 HSLS 라우팅 프로토콜이다[2]. Hazy-sighted link state(HSLs) 라우팅은 control overhead와 route sub-optimality 사이의 균형을 맞출 수 있는 proactive 기반의 경로 설정 프로토콜이다.

메쉬 네트워크는 그 밖에 기업망, 교통망, 빌딩 자동화, 의료시스템에서 유선 설치가 힘들거나 비용이 많이 드는 경우 유용하게 사용될 것으로 전망된다.

1.3 필요한 요소기술들

물리계층에서는 무선 통신 기술 중 최첨단 기술들이 wireless mesh network에서 많이 사용될 것으로 생각된다. 예를 multiple antenna 시스템을 사용하여 송수신 이득을 높이고, 여러 사용자와 동시에 통신이 가능할 수 있다. 좀 더 빨리 이용 가능한 기술로는 multi-radio를 사용하는 방법이 있다. 이 경우 각 radio unit을 어느 주위 노드와 통신하는데 할당하는 지를 중앙집중형 혹은 분산 알고리즘으로 결정하는 것이 주요 기술이 된다. 이 외에도 power control을 통해서 주위 노드간의 connectivity를 조절하는 것이 망 성능에 큰 영향을 끼치는 문제이다.

Media Access Control(MAC) 계층에서는 무선 네트워크의 multi-channel과 위에서 설명한 멀티 radio 를 어떻게 효율적으로 사용하는 가가 주된 과제이다. 예를 들어 멀티 radio unit이 있는 경우 그 상위에 multi-radio unification protocol(MUP)[3]을 올려서 각 radio interface를 주위 노드들과 효율적으로 사용하고 링크 성능에 따라 채널을 재설정하는 연구결과가 있다. 본 논문 뒷부분에서는 single radio 에서 MAC 프로토콜 성능을 좌우하는 링크들간의 carrier sensing과 interference 관계들을 분석하는 연구들을 소개한다.

네트워크 계층은 기존의 홉 수(hop count)를 기반으로 하는 라우팅이 메쉬 네트워크 환경에 적절치 않기 때문에 각 무선 링크를 어떻게 정량화하는가가 이슈이다. Round trip time, expected retransmission count, expected transmission time 등이 주요 요소로 간주된다. 그 밖에 multi-path routing, load balancing 등이 이슈가 있으나, 현재 중요한 연구 주제는 극심한 혼잡으로 무선 링크 상의 MAC 레벨 재전송이 모두 실패하면 링크가 끊긴 것으로 간주하고 네트워크 계층이 경로 재설정을 시도하게 것을 방지하는 것이다. 왜냐하면 경로 재설정 시 처리율의 급격히 저하되기 때문이다. 이를 위해 multi-path 혹은 multi-radio routing들이 이용될 수 있다. 더 나아가서 QoS 보장문제, multicasting, mobility support 문제 등이 향후 네트워크 계층에서 연구되어야 하는 주제이다.

2. 메쉬 네트워크 링크의 성능 측정 및 예측 모델

메쉬 네트워크는 근본적으로 사용자들에 광대역 인터넷 서비스를 제공할 수 있어야 한다. 현재 가장 기본에 되는 IEEE 802.11과 같은 CSMA(Carrier Sensing Multiple Access) MAC 프로토콜은 원래 하나의 무선hop에서 괜찮은 성능을 보이나, 멀티 홉 메쉬 네트워크에서는 급격한 성능저하를 보인다. 그 이유 중에 가장 중요한 것은 carrier sensing과 interference인데, 예를 들어 한 노드가 통신을 하고 있으면 carrier sensing에 의해 다른 노드는 송신을 할 수 없다. 또한 carrier sensing 범위 밖에 위치한 노드는 송신하는 노드에 상관없이 패킷을 송신하게 되므로 수신자가 패킷을 수신하는 것을 방해(interference)할 수 있게 된다. 이를 hidden node problem이라고 한다. 본 장에서는 이 두 가지 mechanism에 의한 메쉬 네트워크의 링크 성능을 모델링하고 측정하는 대표적인 최근 논문들을 소개한다.

2.1 Link Interference Ratio & Broadcast Interference Ratio

Microsoft Research 연구진의 논문[4]에서는 멀티 홉 메쉬 네트워크에서 임의의 2개의 무선 링크 사이의 interference 정도를 예측하고 척도화 하는 방법을 제안하였다. 여기서 무선 링크라 함은 임의의 송신 노드와 수신 노드 사이의 통신을 일컫는다. 따라서 두 개의 무선 링크는 서로 겹치지 않은 2개의 송신 노드와 2개의 수신노드 사이의 무선 통신을 가리킨다. Interference의 정도를 측정하는 가장 직접적인 방법은 네

트워크 상에 존재하는 모든 링크의 쌍을 테스트 해보는 것이다. [4]에 따르면 2개의 링크 L_1 과 L_2 사이의 interference는 다음과 같이 LIR(Link Interference Ratio)로 표현될 수 있다.

$$LIR = \frac{P_1' + P_2'}{P_1 + P_2} \quad (1)$$

이 때 P_1 와 P_2 는 각각 아무런 interference가 없을 때의 링크 L_1 과 L_2 의 unicast goodput²⁾을 가리키고 P_1' 과 P_2' 은 2개의 링크가 동시에 통신할 때의 unicast goodput을 가리킨다. 만일 L_1 과 L_2 가 서로 아무런 interference 영향을 주고 받지 않는다면 LIR은 1의 값을 가질 것이고 LIR이 1보다 작은 값을 가진다면 2개의 링크가 동시에 전송을 시도할 때 두 링크의 총 goodput이 감소하며 따라서 두 링크 사이에 interference가 존재한다는 것을 의미한다. LIR이 작은 값을 가질수록 interference의 정도가 심하다는 것을 나타낸다. 이 논문에 따르면 대부분의 링크 쌍은 아래 그림과 같이 1 아니면 대략 0.5의 LIR 값을 가진다.

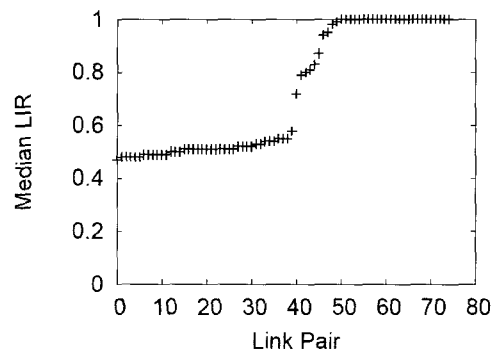


그림 3 75개의 링크 쌍의 LIR

위 그래프는 Microsoft Research 연구소의 건물에 설치된 메쉬 네트워크 테스트베드상에 75개의 링크 쌍에 대해서 측정된 각 링크 쌍 LIR 값의 median 값을 표시한 것이다. 이 논문에서는 0.5 근처의 값을 가지는 링크 쌍은 두 링크의 송신 노드들이 서로 carrier sensing 하여 절반씩의 채널용량을 사용하는 경우가 대다수임을 보였다.

네트워크상에 n 개의 노드가 존재한다면 $O(n^2)$ 개의 링크가 존재할 것이며, 모든 링크의 쌍에 대해서 LIR을 측정한다면 $O(n^4)$ 번의 측정 오버헤드가 필요하다. 따라서 이 오버헤드를 줄이기 위해서[4] 논문에서는 BIR(Broadcast Interference Ratio)를 제안하고

2) 송신노드가 전송시도한 데이터의 양을 가리키는 링크 throughput과 구분하여 수신노드가 성공적으로 수신한 데이터의 양을 가리키는 용어로 링크 goodput을 사용한다.

있다. BIR은 LIR과 유사하게 정의되며 다만 네트워크 상의 임의의 링크 쌍을 측정하는 것이 아니라 노드의 쌍을 선정하여 unicast가 아닌 broadcast 메시지를 송신하도록 하고 이웃 노드 들은 각각 2개의 broadcast 송신노드로부터의 goodput을 측정하여 LIR과 같은 방식으로 BIR을 계산한다. BIR은 모든 링크의 쌍이 아니라 노드의 쌍을 대상으로 측정하기 때문에 $O(n^2)$ 의 측정 오버헤드가 소요된다(4). 논문의 측정 결과에 따르면 BIR은 링크 쌍의 무선 링크 interference의 정도를 LIR과 거의 유사한 정확도로 예측할 수 있다.

BIR과 LIR이 두 링크 사이의 interference 의 정도를 잘 반영하기는 하지만, 각 링크의 goodput share가 얼마인지를 나타내지는 못한다. 예를 들어 BIR 또는 LIR이 0.5인 경우에 (1) 하나의 링크가 전체 채널 goodput을 사용하고 나머지 링크의 goodput이 0인 경우와(2) 두 개의 링크가 평등하게 goodput을 나누어서 사용하는 경우를 구분할 수 없다는 약점이 있다.

2.2 Modeling Per-flow Throughput

임의 접근 방식의 프로토콜을 사용하는 멀티 홉 무선 네트워크에서는 자원을 공유하는 flow 사이에서 심각한 수준의 throughput 불평등 현상이 발생할 수 있다고 잘 알려져 있다. Rice University, E. W. Knightly 교수 연구진의 논문(6)에서는 불평등한 throughput 분배 현상의 근본 원인이 CSMA(Carrier Sense Multiple Access) 방식의 임의 접근 프로토콜의 근본적인 특성이라 말하고 있다. 저자들은 실제 네트워크에서 flow의 throughput을 예측할 수 있는 이론적인 모델을 제안하고 노드들 사이의 throughput 불평등(unfairness) 정도를 정량화 할 수 있는 척도를 제안하였다. 저자들은 이러한 모델과 분석을 바탕으로 멀티홉 메쉬 네트워크에서의 throughput 불평등 문제를 고려한 좀더 합리적인 MAC, 네트워크 프로토콜을 디자인할 수 있다고 주장한다.

이 논문(6)에서는 싱글홉 access 네트워크에서의 802.11 DCF 성능 분석의 초석을 제공한(7) 큐잉 모델을 멀티홉 네트워크에서 단일 링크의 성능 분석이 가능하도록 확장하였다. (7)이 Hidden node가 존재하지 않는 싱글 홉 네트워크의 성능을 모델링 한 반면 (6)에서는 일반적인 멀티 홉 혹은 메쉬 토폴로지 상에서 임의의 링크의 per-flow throughput을 모델링하였다. 이를 위해서 노드들 간의 carrier sensing 관계를 그래프 이론의 Maximal clique분석을 사용하여

표현하고 멀티 홉 상황에서 hidden interference 를 상황별로 분류, 분석하여 패킷의 충돌 확률을 계산을 하였다.

이러한 정확한 모델링의 결과로 계산된 per-flow throughput과 NS-2시뮬레이션의 결과를 비교하여 얻은 50개의 flow에 대한 비교 그래프는 아래와 같다. 모델링과 시뮬레이션에 의한 두 값의 차이는 평균 4.8%로써 모델링이 정확함을 보였다. 하지만 (6)에서 제안한 이 모델은 정확한 계산을 위해 상당히 높은 계산 복잡도가 수반된다.

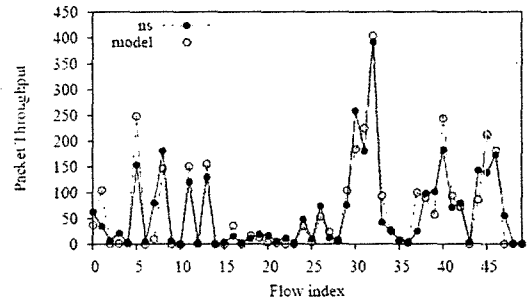


그림 4 50개 flow throughput의 모델링과 시뮬레이션 비교

위의 그래프에서 각 flow들 사이에 throughput이 매우 불균등함을 볼 수가 있는데, 이러한 정도를 정량화 하기 위해 경제 분야에서 사용하는 개념인 지니 계수를 도입하여 불평등의 정도를 표현하였다. 이 값을 기준으로 throughput 불평등 상황을 파악하고 전송 속도 조절 등의 MAC 기반 해법을 제시하고 있다.

2.3 Measurement-Based Models of Delivery and Interference in Static Wireless Network

무선 네트워크 상의 임의의 송신자와 수신자 사이의 무선 통신은 다른 송/수신자 사이의 무선 통신에 의해 영향을 받게 된다. 예를 들면, 송신자는 동일 채널 상의 다른 송신자가 패킷을 전송하는 것을 감지하였을 경우(Carrier Sensing) 그 전송이 끝날 때까지 자신의 전송을 지연한다. 또는 송신자가 패킷을 올바르게 송신하였다 하더라도 수신자의 위치에 존재하는 외부 간섭(External Interference) 신호의 방해로 인하여 패킷 수신에 실패할 수도 있다. 따라서 어떤 링크의 특성을 정확히 예측하기 위해서는 이러한 링크 간의 간섭을 고려한 모델이 필요하게 된다.

하지만 많은 예측 모델은 신호의 세기가 거리가 멀어짐에 따라 일정 비율로 감소한다는 단순한 RF 전파 모델(RF propagation mode)을 이용하고 있다. 이 모델을 사용하면 예측 모델을 단순화할 수는 있지만, 정확한 결과 예측은 그만큼 어렵게 된다. 왜냐하면 무

3) hidden node 효과에 의해서 발생할 수 있음(5).

선 신호의 전송은 거리뿐만 아니라 장애물 등 다양한 요소에 의해서 결정되는 복잡한 현상이기 때문이다. 또한 수신자의 위치에 존재하는 외부간섭의 크기도 패킷 전달에 영향을 미치게 된다. 장애물의 존재여부, 수신자의 위치에 존재하는 외부 간섭의 크기와 같은 요소들은 특정한 일반적 모델로 예측할 수 없는 네트워크의 고유한 특성이다.

이러한 RF 전파의 복잡성을 고려하면서 동시에 예측의 정확성을 높이기 위하여, University of Washington 연구진은 그들의 최신 논문 [8]에서 RF 전파와 관련한 파라미터, 즉 RF 프로파일(RF profile)을 실제 측정을 통해서 구하고, 그 결과를 입력으로 하여 패킷 전달 확률, throughput 등을 예측하는 측정 기반 모델(Measurement-Based Model)을 설계하였다. 이 모델에서 필요로 하는 RF profile과 상수값은 아래와 같다.

표 1 측정기반모델의 입력값

Model의 입력값		획득 방법
\hat{p}_r	노드 r에서 측정된 RSS와 패킷 전송률의 함수	RF 프로파일 측정
\bar{R}_{sr}	s에서 r로 전송한 패킷의 RSS 평균	
\bar{I}_r	r에서 측정된 외부간섭 신호의 평균 세기	
n_r	카드 내부의 잡음	H/W에서 정의되는 상수
δ_r	성공적인 패킷 전달을 위한 SINR threshold	
β_r	Carrier Sensing threshold	

네트워크의 RF profile을 얻기 위한 실험은 다음과 같다. 네트워크를 구성하는 각 노드들은 차례로 2분간 브로드캐스트 패킷을 전송하고, 그동안 나머지 노드들은 이 노드로부터 전송된 신호의 세기 Received Signal Strength(RSS)의 평균값 \bar{R}_{sr} 과 패킷 전송률 \hat{p}_r 을 측정한다. 그리고 측정된 RSS의 변동률을 이용하여 각 노드에 존재하는 외부 간섭의 평균 크기인 \bar{I}_r 을 계산한다. 이로써 N개의 노드로 구성된 네트워크의 RF 프로파일을 구성하는 모든 항목을 O(N)의 측정 시간만에 효율적으로 구할 수 있게 된다. 이 방법의 또 다른 장점은 그 실용성에 있다. 수신된 패킷의 RSS나 패킷 전송률 등은 일반적인 무선 네트워크에서 쉽게 얻을 수 있는 값이기 때문에, 특별한 장치나 프로그램의 수정 없이 예측 모델을 네트워크에 적용할 수 있다.

RF 프로파일이 구해지면, 이제 패킷의 전송 확률을 구할 수 있다. 송신노드 s와 수신노드 r 사이의 무선 링크에 대한 패킷 전송 확률 $p_r(S_{sr})$ 은 다음과 같이 정

의할 수 있다.

$$p_r(S_{sr}) = \Pr \left\{ \frac{\bar{R}_{sr} - \bar{I}_r}{I_r + n_r} \geq \delta_r \right\} \approx \hat{p}_r(\bar{R}_{sr})$$

위의 식은 수신된 신호의 세기가 수신자 r에 존재하는 외부간섭과 잡음 신호의 세기보다 특정 비율 이상으로 커지게 되면 패킷이 수신된다는 것을 의미한다. 위의 기본적인 모델을 확장하면 다른 링크의 간섭이 존재하는 상황에서의 특정 링크의 throughput을 예측할 수 있게 된다. 실제 15개의 노드로 구성된 테스트베드에 예측모델을 이용하여 측정한 결과는 아래와 같다.

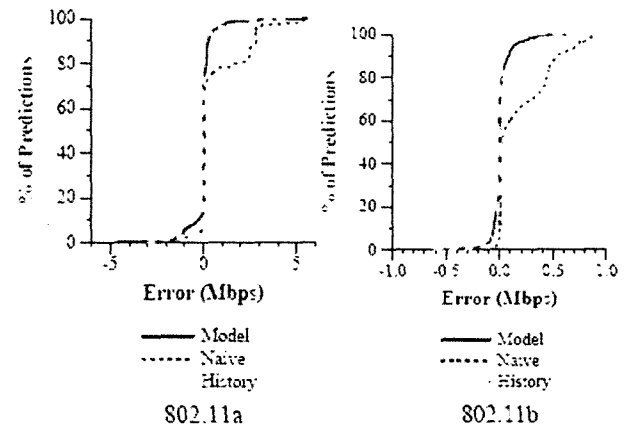


그림 5 측정 기반 모델의 오차 분포

위의 그림은 802.11a와 802.11b 네트워크에서 모델을 이용한 throughput의 예측값과 실제 측정값 사이의 오차의 분포를 나타내는 누적분포함수의 그래프이다. 위의 그래프에서는 실선이 모델의 오차를 나타낸다. 실선이 X축 0의 위치에서 수직선에 가까울수록 모델이 정확하다는 것을 의미하므로, 위의 그래프는 이 예측 모델이 비교적 정확하게 네트워크의 throughput을 예측한다는 것을 보여준다.

3. Intermittent Nature of Carrier Sensing and Interference

3.1 Testbed in SNU

Carrier Sensing과 Interference가 무선 링크에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 서울대 연구팀은 9개의 무선 노드로 구성된 802.11a 메쉬 네트워크(Mesh Network) 테스트베드를 구축하였다. 테스트베드의 각 노드는 하나의 보드4)에 Atheros 칩셋5)을 사용한 무선 랜카드를 장착하고 있다. 9개의 무선 노

4) Soekris, inc. <http://www.soekris.com/>

5) Atheros Communications, inc. <http://atheros.com/>

드는 같은 층에 존재하는 3개의 연구실에 분산 배치되었다.

3.2 Carrier Sensing

앞서 살펴본 측정기반모델을 포함하여 현재까지 제시된 대부분의 모델들은 하나의 공통적인 가정을 전제로 하고 있다. 그것은 바로 Carrier Sensing과 Interference의 효과가 *all or nothing*의 형태로 나타난다는 것이다. 하지만 본 서울대 연구진은 테스트베드 상에서 수행한 측정 실험을 통하여 Carrier Sensing과 Interference의 효과가 부분적으로 나타날 수 있다는 사실을 관찰하였다.

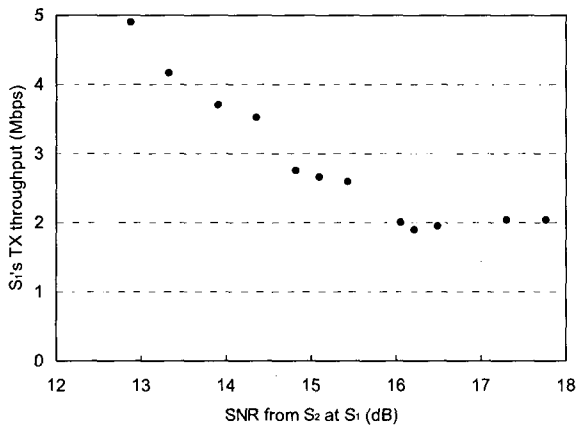


그림 6 수신 신호의 세기에 따른 Carrier Sensing 효과

위의 그래프는 Carrier Sensing이 부분적으로 나타나는 모습을 보여주고 있다. X축은 송신자에서 감지된 다른 송신자로부터 전송된 신호의 세기를 나타낸다. 여기서 신호의 세기는 신호잡음비율(SNR: Signal-to-Noise-Ratio) 단위로 표현되었다. SNR값이 커지면 송신자는 Carrier Sensing에 의해 자신의 패킷 전송을 지연시키기 때문에, 송신자의 throughput은 SNR이 커짐에 따라 줄어들게 된다. 하지만 위의 그래프에서 보여지는 바와 같이, SNR이 특정 범위(13~16dB) 사이에 위치하게 되면 송신자의 throughput은 선형적으로 감소한다. 즉, 신호의 세기가 특정 범위에 속하게 되면 Carrier Sensing의 효과는 부분적으로 나타난다는 것을 보여준다.

3.3 Interference

Interference의 경우도 마찬가지이다. 위의 그림은 수신자에서 측정된 신호간섭비율(SIR: Signal-to-Interference-Ratio)의 값에 따라 패킷 수신율이 달라지는 모습을 보여주고 있다. 위의 그래프를 보면 SIR이 특정 범위(12~24dB)에 위치할 때에는 패킷 수신율이 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 즉,

Interference에 의해 패킷 수신에 실패하는 현상이 SIR의 값에 따라 부분적으로 나타난다는 것을 보여준다.

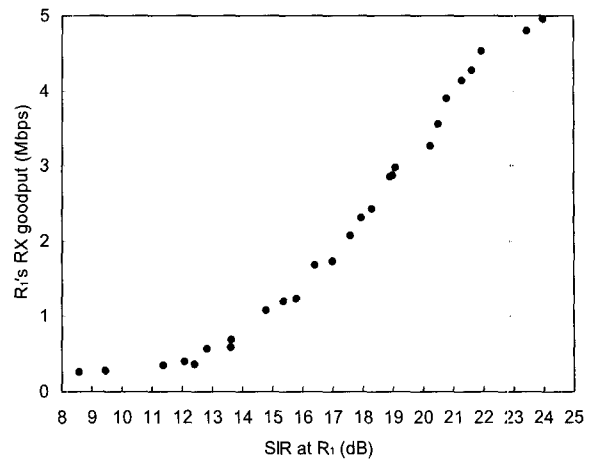


그림 7 SIR에 따른 Interference 효과

Carrier Sensing과 Interference의 효과가 *all or nothing*이 아니라 간헐적으로 나타날 수 있다는 사실은 예측 모델이 보다 더 정확한 throughput 예측을 위해서 이러한 특징을 고려해야 한다는 것을 의미한다.

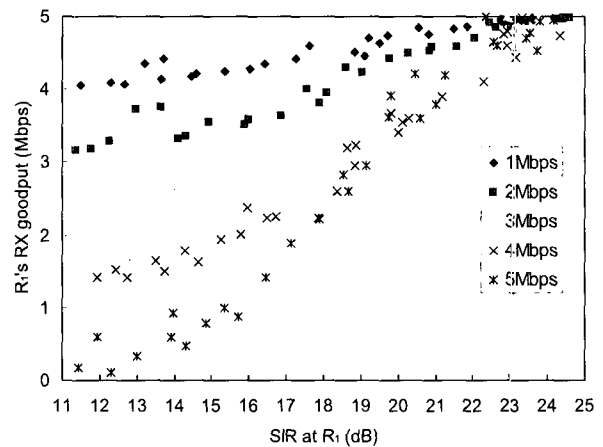


그림 8 SIR에 따른 패킷 수신율 변화

위의 그림은 Interference의 이러한 속성이 예측 모델에 어떻게 이용될 수 있는지를 보여주고 있다. 이 실험은 하나의 송신자와 하나의 간섭노드(Interferer)가 서로를 Carrier Sensing하지 않는 상태에서 동시에 패킷을 전송할 때, 수신자에서 측정된 SIR의 값과 패킷 수신율의 관계를 보여주고 있다. 송신자와 수신자는 6Mbps의 전송속도를 이용하도록 설정하였기 때문에, 응용 프로그램에서 측정한 throughput은 최대 5Mbps의 값을 가진다. 송신자는 5Mbps로 패킷을 전송하도록 고정하고, 간섭 노드는 1~5Mbps로 패킷을 전송하도록 조정하였다. 이 경우, 패킷 수신율 G는 아래와 같이 간단하게 모델링할 수 있다.

$$G = 5 - T_{int} \cdot F$$

T_{int} 는 간접 노드의 throughput을 나타내고, 여기서 F 는 Interference에 의해 패킷 수신이 방해받는 정도를 나타내는 변수이다. F 는 SIR값에 의해 정의될 수 있다. F 의 값은 SIR이 12보다 작거나 24보다 큰 경우에는 각각 0이나 1의 값을 가지고, 12와 24 사이에서는 0에서 1 사이에서 선형적으로 증가한다. 위의 모델을 이용하여 예측한 값과 실제 측정된 값의 차이는 평균이 0.005Mbps, 표준오차가 0.227Mbps로 나타났다. 이를 통해 위의 모델은 Interference가 부분적으로 나타나는 상황에서도, throughput을 비교적 정확하게 예측한다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 먼저 broadband wireless 인터넷 서비스를 제공할 수 있는 매력적인 솔루션으로 대두되고 있는 무선 메쉬 네트워크의 여러가지 측면을 살펴 보았다. 기존의 DSL, cellular, WiMax 망에 비해서 메쉬 네트워크는 고유한 시장에서의 장점이 있으며 이를 기반으로 community area network, enterprise network, metropolitan area network 등 많은 분야에서 폭넓게 사용될 것이다. 이를 위해서는 사용자들의 높은 처리율을 제공해야 하는데, Wireless multi-hop이라는 특성상 처리율 성능 향상을 위해 많은 기술적인 문제들이 존재한다. 저자들은 이를 위해 가장 기초적인 문제인 무선 링크들 간의 carrier sensing과 interference 관계들을 모델링, 분석, 및 측정하는 관련 연구들을 소개하고 기존 연구들에 다루어지지 않았던 grey zone(intermittent zone)에 대한 실험 측정 결과를 소개하였다.

참고문헌

- [1] Ian Akyildiz, Xudong Wang, Weilin Wang, "Wireless Mesh Networks: A Survey," Elsevier Computer Networks, Vol. 47, No. 4, pp. 445-487, Mar. 2005.
- [2] C. Santivanez, R. Ramanathan, "Hazy Sighted Link State (HLS) Routing: A Scalable Link State Algorithm." BBN Technical Memorandum No. 1301, August 31, 2001.
- [3] Atul Adya, Paramvir Bahl, Jitendra Padhye, Alec Wolman, Lidong Zhou, "A Multi-Radio Unification Protocol for IEEE 802.11 Wireless Networks," IEEE BroadNets 2004.
- [4] J. Padhye, S. Agarwal, V. Padmanabhan, L. Qiu, A. Rao, and B. Zill, "Estimation of Link Interference in Static Multi-hop Wireless Networks," in *Proc. of Internet Measurement Conference (IMC)*, Berkeley, CA, USA, Oct. 2005.
- [5] S. Khurana, et al., "Effect of Hidden Terminals on the Performance of IEEE 802.11 MAC Protocol," in *Proc. Of 23rd Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, Lowell, MA, USA, Oct. 1998.
- [6] M. Garetto, T. Salonidis, and E. W. Knightly, "Modeling Per-flow Throughput and Capturing Starvation in CSMA Multi-hop Wireless Networks," in *Proc. of IEEE INFOCOM 2006*, Barcelona, Spain, April 2006.
- [7] G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3):535-547, March 2000.
- [8] C. Reis, et al., "Measurement-Based Models of Delivery and Interference in Static Wireless Networks," in *Proc. of ACM SIGCOMM 2006*, Pisa, Italy, Sep. 2006.

권태경



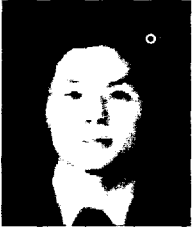
1993 서울대 컴퓨터공학과(학사)
 1995 서울대 컴퓨터공학과(석사)
 2000 서울대 컴퓨터공학과(박사)
 2001 UCLA 연구원
 2003 뉴욕시립대 연구원
 2004~현재 서울대 컴퓨터공학과 조교수
 E-mail : tkkwon@snu.ac.kr

이 정 근



2001. 2. 서울대학교 컴퓨터공학부(학사)
2001. 3.~현재 서울대학교 컴퓨터공학부
석박사 통합과정
2006. 2.~2006. 8. HP Lab., USA
인턴
관심분야: RFID 시스템, 무선 메쉬 네트
워크, LBS
E-mail : jklee@mmlab.snu.ac.kr

김 원 호



2001. 3.~2003. 3. Tracknine 개발팀
근무
2003. 3.~2005. 3. KEBT
자바카드개발팀 근무
2006. 8. 서울대학교 컴퓨터공학부(학사)
2006. 3.~현재 서울대학교 멀티미디어&
모바일통신 연구소 인턴
관심분야: 무선 메쉬 네트워크, 무선랜

조 대 형



2006. 2. 서울대학교 컴퓨터공학부(학사)
2006. 3.~현재 서울대학교 컴퓨터공학부
석사과정
관심분야: 무선 메쉬 네트워크, LBS,
802.11 및 16 표준

• 제17회 통신정보 합동학술대회 •

- 일 자 : 2007년 5월 2~4일
- 장 소 : 휘닉스파크
- 내 용 : 논문발표 등
- 주 최 : 정보통신연구회
- 상세안내 : <http://jcci21.or.kr>