

무선 메쉬 네트워크 관리: 토폴로지 맵 구축과 네트워크 성능 모델링 중심으로

권태경 | 이정근 | 김원호
서울대학교

I. 메쉬 네트워크 소개 및 관리 기법 연구의 중요성

현재 IEEE 802.11을 주 기반으로 한 무선 wi-fi 서비스는 상대적으로 좁은 지역의 사용자들에게 쉽게 무선 네트워크를 제공하는 hot spot 서비스로 널리 사용되고 있다. 최근에는 캠퍼스, 회사, 거주지역등 상대적으로 넓은 지역에도 사용자들이 유선 연결 없이 인터넷 서비스를 받을 수 있도록 하기 위해서 무선 wi-fi 네트워크를 설치하고 있다. 하지만 wi-fi AP (Access Point)를 설치하기 위해서는 결국 이더넷과 같은 유선연결이 필요하며 AP를 이더넷에 연결하기 위한 설치비용이 소요되고 경우에 따라서는 설치 지역에 유선망을 새로 구축해야 하기 때문에 큰 비용이 소요된다.

무선 메쉬 네트워크는 멀티홉 통신을 수행하는 무선 라우터들로 이루어진 백본망을 통하여 다수의 AP들과 유선망 사이의 연결을 제공하는 서비스이다 [COMNET2005]. (그림 1 참조). 하나 또는 소수의 라우터들이 유선망에 연결되어 게이트웨이 역할을 수행하고 사용자에게 네트워크 서비스를 직접 제공하는 메쉬 AP (MAP)들은 라우터 역할을 수행하는 메쉬 포인트 (MP)을 거쳐서 게이트웨이와 연결된다. 게이트웨이를 제외한 MAP와 MP 들은 파워가 제공되는 곳이라면 어느 곳이나 설치 될 수 있기 때문에 유선망에 대한 제약조건 없이 저렴하고 손쉽게 네트워크 서비스를 제공할 수 있다. 따라서 미국처럼 주거 밀도가 낮은 지역과 유선망 설치 비용을 감당할 수 없는 빈곤국가에서는 메쉬 기술을 통하여 community 네트워크를 구축하고 인터넷 서비스를

제공하고자 하며 그 밖의 교통시스템, 광대역 스마트 홈, 사무 공간을 위한 enterprise network 에 메쉬 기술을 접목하는 시도가 활발히 이루어지고 있다.

메쉬 백본 네트워크는 복잡한 설치와 유지 보수 없이 멀티홉 무선 통신으로 네트워크 연결을 제공한다는 점에서 군사용으로 많이 연구되고 사용되던 애드혹 통신망과 유사하다. 하지만 일시적이거나 위급한 상황에서 빠르게 네트워크 연결을 제공하고자 하는 기존의 이동 애드혹 통신과 다르게 메쉬 네트워크는 고정된 라우터들을 사용하여 고속의 안정적인 네트워크 서비스를 제공하는데 목표를 두고 있으며, 상용서비스를 가정한 operator 들의 관심이 매우 높다.

따라서 기존의 애드혹 통신망과는 다르게, 메쉬 백본 네트워크에 대한 운영관리가 필수적이며 유선 네트워크 인프라 없이 고속의 무선 네트워크 서비스를 안정적으로 제공하기 위해서는 분산형 프로토펴에만 의지 하는 것이 아니라 중앙 집중형의 관리 기법을 통한 성능 향상 연구가 진행되어야 한다.

II. 메쉬 네트워크 관리

메쉬 네트워크 관리를 위해서는 크게 2가지의 관리 기법이 필요하다. 첫째, 현재 네트워크를 이루고 있는 메쉬 노드들 사이의 토폴로지를 알아야 한다. 여기서 토폴로지라 함은 단순히 각 노드가 설치되어 있는 물리적 위치를 뜻하는 것이 아니라, 네트워크를 이루고 있는 노드들과 그들 사이의

무선 링크들의 집합으로 이루어진 논리적 그래프를 뜻한다. 이 그래프는 무선 링크의 성능과 노드들 사이의 경쟁관계, 링크들 사이의 간섭의 정도 등의 정보를 포함하는 일종의 토폴로지 맵 (Topology Map)이어야 한다. 이러한 토폴로지 맵을 구축하기 위해서는 네트워크를 효율적으로 모니터링하기 위한 모니터링 기법과 수집된 내용을 분석하여 토폴로지 맵을 구축하기 위한 무선 링크 모델링이 필요하다.

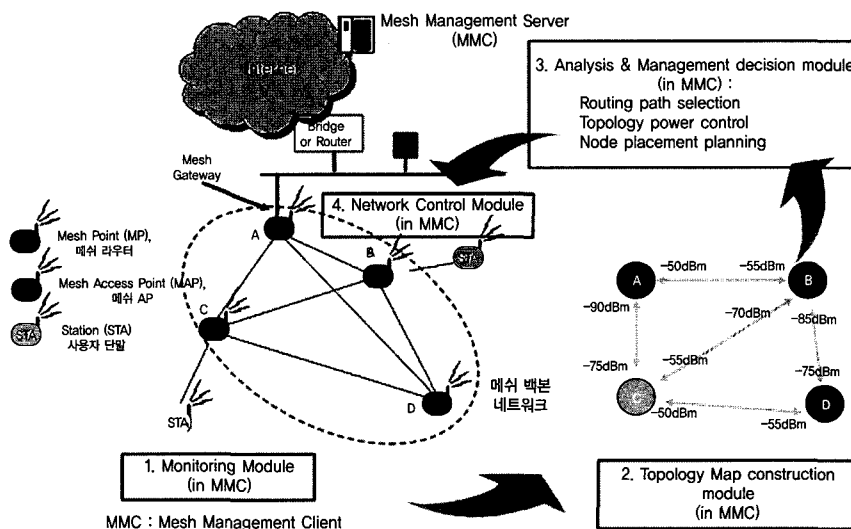
둘째, 구축된 토폴로지 맵을 기반으로 현재 네트워크의 성능을 최적화하기 위한 성능 모델링 및 최적화 기법이 필요하다. 즉 토폴로지 맵을 분석하여 요구되는 QoS 를 보장하면서 성능을 최적화 하기 위한 네트워크 운영 관리 결정을 내려야 하는데 여기에는 라우팅 경로 설정, 송신 출력 조절, 트래픽 제어, 게이트웨이 위치 선정등이 포함된다. 결정 사항들은 망에 적용되고 그 결과가 다시 모니터링되어 토폴로지 맵 구축 단계에서 반영되며 이에 근거해서 다시 운영 결정을 내리고 망에 반영하는 순환 관리가 필요할 것이다.

본 연구진은 이러한 순환 관리 시스템을 구축하기 위해서 (그림 1)과 같은 메쉬 네트워크 운영관리 시스템 아키텍처를 제안하고 이를 테스트베드를 통해서 구축하고 있다.

본 연구진이 구축중인 메쉬 운영관리 시스템은 크게 모니터링, 토폴로지 구축, 분석 및 운영결정, 및 망 제어 의 4가지 모듈로 이루어져 있다.

모니터링 모듈은 망을 구성하는 무선 노드들 (게이트웨이, MP, MAP)의 특성과 그들 사이의 링크 성능을 측정하여 토폴로지 구축 모듈에게 넘겨준다. 단순한 무선 모델을 사용하여 토폴로지를 구성하고 성능을 분석한 기존 연구와 달리, 우리는 망의 성능을 좌우하는 큰 요소가 무선 채널에서의 경쟁과 간섭임을 고려하여 실제로 측정된 신호세기와 수신 성공률에 기반한 네트워크 토폴로지 맵을 구축한다. 분석 및 운영결정 모듈은 앞 단계에서 구축된 토폴로지 맵을 사용하여 무선 링크들 사이의 경쟁, 간섭, 방해 정도를 분석하고 각 개별 링크의 성능 뿐만 아니라 여러 링크가 동시에 동작하는 상황에서의 성능을 예측한다. 이에 기반하여 망의 성능을 최적화 하기 위한 다양한 운영관리 결정을 내린다. 여기에는 사용자의 요구를 충족시키기 위한 라우팅 경로 설정, 각 노드의 송신 파워 조절을 통한 간섭 제어, 설치 비용을 최소화 하면서 최대의 성능을 내기 위한 게이트웨이 위치 선정 등이 포함될 것이다. 마지막으로 망 제어 모듈은 운영결정 모듈에서 결정한 사항들을 메쉬 노드들에게 적용하여 성능을 향상시킬 것이며 그로 인한 성능의 변화는 모니터링 모듈에서 측정하여 다시 토폴로지 구축 모듈에 의해서 분석되는 순환 구조를 이룬다.

지금까지 설명된 단계들에서 토폴로지 구축 모듈과 분석 및 운영결정 모듈은 메쉬 운영 서버상 (MMS) 에서 구현되어



(그림 1) 메쉬 네트워크 운영관리 시스템 아키텍처

동작하며 모니터링 모듈과 망 제어 모듈은 각 메시 노드상에서 동작하는 메시 운영 클라이언트 (MMC) 프로그램에 의해서 동작한다.

III. 토폴로지 맵 구축

본 장에서는 토폴로지 맵 구축의 선행 연구들을 소개하고 본 연구진의 신호세기를 이용한 토폴로지 맵 구축 기법을 소개한다.

동일한 무선 채널을 사용하는 무선 링크들은 그 물리적 속성상 서로 다른 링크의 데이터 송수신을 방해(Interference)할 수 있다. 이러한 Interference는 무선 네트워크의 성능에 직접적인 영향을 미치게 되는데, 특히 멀티 홉 통신이 많은 무선 메시 네트워크에서는 Interference가 전체 네트워크의 효율성을 결정하는 중요한 변수가 된다.

무선 네트워크에서의 Interference는 크게 carrier sensing과 hidden interference로 분류된다. 예를 들어 한 노드가 송신을 하고 있으면 carrier sensing에 의해 다른 노드는 송신을 할 수 없다. 또한 carrier sensing 범위 밖에 위치한 노드는 송신하는 노드에 상관없이 패킷을 송신하게 되므로, 수신자에서 패킷 충돌(packet collision)이 발생할 수 있고, 결과적으로 수신자가 패킷을 수신하는 것을 방해(interference)할 수 있게 된다.

무선 메시네트워크 관리 시스템의 목적은 현재 네트워크의 상태를 정확하게 진단하고, 그 정보를 바탕으로 네트워크의 효율성을 극대화하는 정책을 수립하는 데에 그 목적이 있다. 따라서 네트워크의 토폴로지 맵을 구축할 때에는, 개개의 무선 링크에 대한 정보 외에 무선 링크 사이에 존재하는 Interference 관계도 포함되어야 한다. 이를 보통 충돌 그래프 (Conflict Graph)라고 하는데 기존의 여러 연구들에서도 이 충돌 그래프의 중요성을 인식하고 이를 정확하고 효율적으로 얻기 위한 연구를 수행하였다.

3.1 LIR & BIR

무선 링크 사이의 Interference 관계를 예측하기 위해 일반적으로 사용되는 가장 간단한 방법은 무선 신호의 세기가

노드 간의 거리에 따라 예측 가능하게 감소한다고 가정하는 것이다. 이러한 가정 하에 무선 신호의 세기를 거리에 의해서만 결정되는 함수로 정의하게 되면, 이러한 함수관계에 기반하여 각 무선 노드의 패킷 전송, carrier sensing, interference 등에 대한 범위를 노드와 떨어진 거리로 표현할 수 있다. 대부분의 네트워크 시뮬레이터는 이러한 방법으로 각 무선 노드의 Interference 범위를 정의하여 사용한다. 하지만 실제 측정 데이터를 이용한 [MSWiM2004] 등과 같은 연구에 따르면, 시뮬레이터에서 사용되는 거리에 기반한 Interference 모델이 매우 부정확한 것으로 나타나고 있다. 왜냐하면 실제 무선 환경에서의 신호 전송은 노드 간의 거리뿐만 아니라, 노드의 위치, 주변의 장애물, 날씨 등 여러 요소에 의해 영향을 받는 매우 복잡한 현상이기 때문이다. 따라서 현실적이고 정확한 Interference 모델을 위해 측정에 기반한 Interference 모델의 연구가 진행되었다.

그 중 대표적인 것으로 Microsoft Research 연구진의 논문 [IMC2005]을 소개한다. 이 논문의 저자들은 멀티 홉 메시 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 두개의 무선 링크는 서로 겹치지 않은 2개의 송신 노드와 2개의 수신노드 사이의 무선 통신을 가리킨다. Interference의 정도를 측정하는 가장 직접적인 방법은 네트워크 상에 존재하는 모든 링크의 쌍을 테스트 해보는 것이다. [IMC2005]에 따르면 2개의 링크 L_1 과 L_2 사이의 interference는 다음과 같이 LIR (Link Interference Ratio)로 표현 될 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 goodput¹⁾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 주고받지 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 존재 한다는 것을 의미한다. LIR이 작은 값

을 가질수록 interference 의 정도가 심하다는 것을 나타낸다. 이 논문에 따르면 대부분의 링크 쌍은 아래 그림과 같이 1 아니면 대략 0.5 의 LIR 값을 가진다. 하지만 LIR 을 이용하여 Interference 를 측정하는 방법은 오버헤드가 매우 크다는 단점이 있다. 즉, 네트워크상에 n 개의 노드가 존재한다면 $O(n^2)$ 개의 링크가 존재할 것이며, 모든 링크의 쌍에 대해서 LIR 를 측정한다면 $O(n^2)$ 번의 측정 오버헤드가 필요하기 때문이다.

따라서 [IMC2005] 의 저자들은 추가로 BIR (Broadcast Interference Ratio) 을 제시하고 있다. BIR 은 LIR 과 유사하게 정의되며 다만 네트워크 상의 임의의 링크 쌍을 측정하는 것이 아니라 노드의 쌍을 선정하여 unicast 가 아닌 broadcast 메시지를 송신하도록 하고 이웃 노드 들은 각각 2 개의 broadcast 송신노드 로부터의 goodput 을 측정하여 LIR 과 같은 방식으로 BIR 을 계산한다. BIR 은 모든 링크의 쌍이 아니라 노드의 쌍을 대상으로 측정하기 때문에 $O(n^2)$ 의 측정 오버헤드가 소요된다. [IMC2005] 논문의 측정 결과에 따르면 BIR 은 링크 쌍의 무선 링크 interference 의 정도를 LIR 과 거의 유사한 정확도로 예측할 수 있다.

하지만, Interference 를 측정하고 정량화함에 있어 LIR 과 BIR 은 한계점을 지니고 있다. 메시네트워크의 관리시스템은 네트워크에 존재하는 무선 링크 사이의 Interference 의 원인을 파악하고, 가능한 범위 내에서 그 효과를 최소화하기 위한 정책을 제시할 수 있어야 한다. 하지만 BIR 은 두 링크 사이의 Interference 의 존재 여부와 그 정도만을 알려줄 뿐 그 원인에 대한 정보는 제시하지 않는다. 예를 들어, BIR 만으로는 두 무선 링크가 동시에 사용될 때에 쓰루풋이 감소하는 이유가 두 송신자 노드 사이에 존재하는 carrier sensing 때문인지, 아니면 두 링크 사이에 존재하는 hidden interference 때문인지 알 수 없다. 만약 그 원인이 두 링크 사이의 carrier sensing 때문이라면, 두 송신자 노드가 사용하는 송신 파워를 약하게 함으로써 Interference 효과를 낮추는 전략을 선택할 수 있다. 하지만 반대로 hidden interference 가 원인이라면, 두 송신자의 전송 파워를 낮추는 것은 오히려 hidden interference 의 영향을 증대시킬 수 있다. 따라서

효과적인 관리시스템을 위해서는 무선 링크의 Interference 정도뿐만 아니라, 그 원인에 대한 정보도 네트워크 토폴로지가 제공할 수 있어야 한다.

3.2 RSS-based Prediction

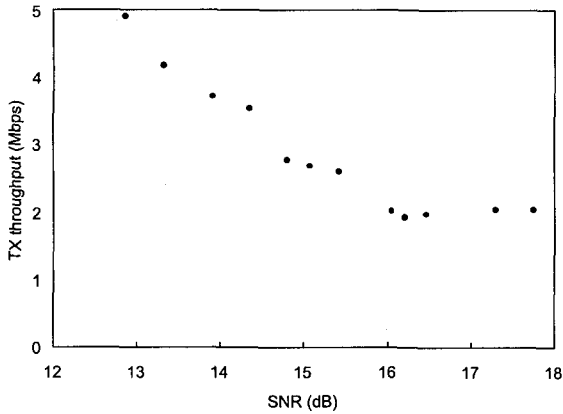
이러한 이유로 본 연구팀은 [SECON2007] 에서 무선 링크 사이의 신호 세기를 이용하여 토폴로지 맵을 구축하는 RBP (RSS-based prediction)을 제시하였다. 앞에서 언급했듯이, 거리에 기반한 Interference 모델은 단순하지만 매우 부정확하고, 실제 쓰루풋 측정을 이용한 LIR/BIR 은 정확하지만 노드 개수가 증가함에 따라 오버헤드가 매우 크고 Interference 의 원인에 대한 정보를 알 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 최소한의 오버헤드만으로 정확하고 상세한 무선 네트워크의 토폴로지 맵을 구축하기 위하여 본 연구팀은 무선 링크의 신호 세기와 Interference 의 관계를 이용하였다.

무선 링크 사이의 Interference 는 두 노드 간의 거리 보다 는 무선 링크의 신호 세기, 즉 RSS (Received Signal Strength) 와 밀접한 연관관계가 있다. 무선 링크의 신호 세기와 Interference 관계를 파악하기 위하여 본 연구팀은 실제 메시 노드를 이용하여 실험을 수행하였다.

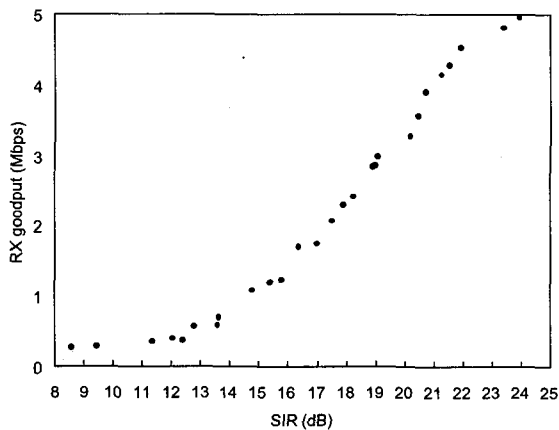
(그림 2)를 보면 SNR (Signal-to-Noise-Ratio) 에 따라 송신자 노드가 carrier sensing 를 하는 정도가 변하는 양상을 보여주고 있다. 이 그래프에서 송신자 노드는 6 Mbps 로 패킷을 전송하도록 설정하였다. 하지만 IP, MAC 층에서의 오버헤드로 인하여 실제 측정되는 최고 쓰루풋은 약 5 Mbps 이다. (그림 2)를 보면, 송신자 노드에서 감지되는 외부 신호의 SNR 이 13 (dB) 이하이면 송신자 노드는 carrier sensing 를 전혀하지 않고 최대 쓰루풋인 5 Mbps 의 속도로 패킷을 전송한다. 하지만 외부 신호의 SNR 이 증가함에 따라 송신자 노드는 carrier sensing 를 점점 더 많이 하게 되고, 패킷 송신 쓰루풋도 그에 따라 선형적으로 줄어들게 된다.

Carrier sensing 은 외부 신호의 세기에만 영향을 받는 것에 비해, Hidden Interference 는 송신자 노드에서 전송된 신호의 세기 뿐만 아니라 방해하는 노드에서 전송된 신호의 세기도 고려해야 한다. 왜냐하면 송신자 노드에서 전송된 신

01_ 송신노드가 전송시도한 데이터의 양을 가리키는 링크 쓰루풋(throughput) 과 구분하여 수신노드가 성공적으로 수신한 데이터의 양을 가리키는 용어로 링크 굿풋(goodput) 을 사용한다.



(그림 2) SNR과 Carrier Sensing의 관계



(그림 3) SIR과 Hidden Interference의 관계

호의 세기가 충분히 크다면, 비록 방해하는 노드에서 전송된 신호로 인하여 수신자 노드에서 패킷 충돌이 발생하더라도 복구가 가능하기 때문이다. 이러한 현상을 무선 링크에서의 Capture Effect 라고 한다[ICNP2004]. (그림 3)에서는 충돌하는 두 패킷의 신호 세기 차이인 SIR (Signal-to-Interference-Ratio) 에 따라 수신자 노드의 수신율이 어떻게 변화하는지를 나타내고 있다. 그림에서 보다시피 SIR 이 낮은 경우에는, 즉 송신자 노드에서 전송된 패킷의 신호세기가 충분히 크지 않은 경우에는 패킷 충돌이 나는 경우 패킷 수신을 하지 못하기 때문에 수신 성공율이 0 에 가깝게 나타난다. 하지만 SIR 이 증가함에 따라 Capture Effect 가 작용하여 수신 성공율이 선형적으로 증가하여 SIR 이 24dB 에 이르

렀을 때는 수신 성공율이 1에 근접하는 것을 관찰할 수 있다. 송신 노드는 항상 최고 쓰루풋 5Mbps 로 송신하고 있기 때문에 5Mbps 의 수신 goodput 은 거의 완벽한 수신 성공율을 뜻한다. 즉, 동시에 전송된 방해 신호에도 불구하고 높은 SIR 로 인해 Interference 를 받지 않은 것임을 알 수 있다.

이와 같이 무선 신호의 세기와 carrier sensing, interference 의 관계를 (그림 2), (그림 3)과 같이 파악하고 나면, 무선 노드 사이에 존재하는 무선 링크의 신호 세기를 측정하면, 무선 링크 간의 Interference 관계를 예측할 수 있게 된다. 무선 링크의 신호 세기를 효율적으로 측정하기 위해서 본 연구팀은 Broadcast 트래픽을 활용하였다. 네트워크의 모든 무선 노드는 차례로 broadcast 트래픽을 발생시키고, 모든 주변 노드들은 송신자 노드가 전송하는 패킷을 수신하고 그 패킷의 신호 세기 RSS 를 기록한다. 무선 링크의 신호세기를 이용하면 우리는 두 링크 사이에 존재하는 carrier sensing 관계와 hidden interference 관계를 예측할 수 있고, 결과적으로 2 개의 무선 링크 사이에 존재하는 Interference 의 정도와 그 원인을 $O(n)$ 의 오버헤드만으로 예측할 수 있다.

위에 제시된 방법의 단점은 한 노드가 broadcast 패킷을 송신할 때에 주변 노드가 그 packet 을 수신할 수 있는 경우에만 무선 링크의 신호 세기를 측정할 수 있다는 것이다. RSS 는 패킷이 정확히 수신되었을 경우에만 측정되기 때문에 무선 링크의 신호 세기를 측정하기 위해서는 주변 노드가 송신 노드의 패킷 전송 범위 내에 있어야 한다는 제약이 있다. RBP 에서는 이러한 제약 조건을 완화하기 위해서 High power/Normal power (HP/NP)를 이용한, 이중화된 전송 파워를 이용하여 채널 상태를 파악한다.

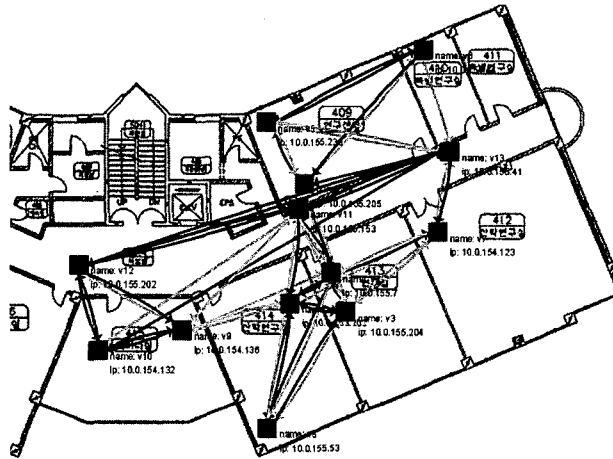
이 기법은 [INFOCOM2005] 에 처음 제시된 방법으로서, 송신 노드가 두 단계의 전송 파워를 연속으로 사용함으로써, 방해하는 Interferer 가 송신 노드의 패킷 전송 범위 밖에 존재하는 경우에도 무선 링크의 신호 세기를 알 수 있게 해준다. RBP 는 HP/NP 를 이용함으로써 메쉬 네트워크의 토폴로지에 대한 더 풍부한 정보를 얻을 수 있고, 따라서 더 정확한 예측을 수행할 수 있다.

(그림 4)에서는 서울대의 무선 메쉬 네트워크 테스트 베드에 RBP 기법을 적용하여 구한 토폴로지 맵을 보여준다. 무선 노드들 사이에 주고 받은 broadcast 메시지의 신호 세기와 수신 성공율을 이용하여 링크의 유무와 품질을 예상하고

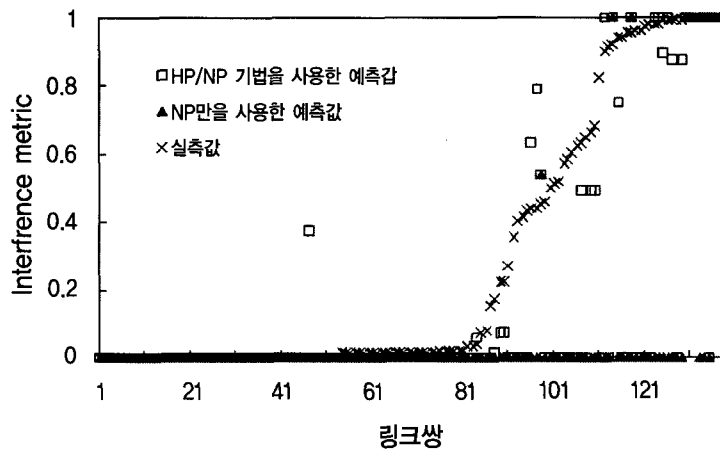
이를 네트워크 토폴로지 맵으로 표현하였다. 링크 품질 뿐 아니라 각 송신자 노드 사이의 carrier sensing 관계, 그리고 링크 사이의 interference 관계 또한 토폴로지 맵에 표현된다.

(그림 5)는 RBP 를 이용한 Interference 예측의 정확성을 보여주고 있다. 서울대에 설치된 무선 메쉬 네트워크 테스트 베드에 존재하는 138 개의 무선 링크 쌍에 대하여 RBP 를 이용하여 Interference Metric을 예측하고 실제 링크 사이의 Interference Metric을 Broadcast 패킷 수신율을 통해서 측정

하여 비교한 것이다. (그림 3)의 관측결과에 보는 바와 같이 수신 성공율이 1일 때, 즉 interference 를 받지 않을 경우에는 Interference Metric은 0이 되며, 수신 성공율이 0 일 때는 Interference Metric은 1이 된다. Metric 예측시에는 SIR 값에 대한 함수로 계산하고, 실험시에는 수신 성공율을 사용하여 Metric 을 얻어 낸다. (그림 5)에서 보는 바와 같이 HP/NP 기법을 사용한 경우의 예측 Metric과 실제 Metric 의 절대 오차는 중간값 0.01, 평균 0.14로 RBP가 상당히 정확하게 Interference 를 예측한다는 것을 나타낸다. HP/NP 기법을



(그림 4) 네트워크 토폴로지 맵



(그림 5) RBP를 이용한 Interference 예측

사용하지 않고 normal power 로 전송된 broadcast 메시지만 사용한 경우에는 예측과 실측 값의 차이가 더 커진다.

본 연구진은 유사한 방법으로 Carrier Sensing Metric 또한 예측하여 실측 값과 비교하였고 절대 오차의 평균이 0.03으로 상당히 정확함을 확인하였다. 서울대 테스트베드 뿐 아니라 미국 팔로 알토에 위치한 HP 연구소의 테스트베드에서도 RBP기법을 통하여 Interference 와 Carrier sensing 을 예측하고 유사한 오차 결과를 얻었다. 이러한 결과는 무선 링크 사이의 신호 세기를 이용한 RBP 의 예측 방법이 적은 비용으로 ($O(n)$ 추정 오버헤드 만으로) 실제 네트워크의 상태를 잘 반영할 수 있음을 보인다.

IV. 네트워크 성능 모델링 및 최적화

토폴로지 맵을 바탕으로 현재 네트워크 성능을 예측하고 성능 개선을 이루기 위해서는 우선 네트워크 모델링이 필요하다. Gupta 와 Kumar의 논문 [ITT2000] 를 필두로 애드혹 무선 네트워크의 용량을 예측한 여러 논문들은 네트워크 성능의 점근적인 bound 값만 제공한다. 하지만 실제로 네트워크를 운영하고 관리하기 위해서는 주어진 네트워크 토폴로지와 특정한 트래픽 패턴 상황에서 각 사용자가 서비스 받는 네트워크 용량을 알 수 있어야 한다.

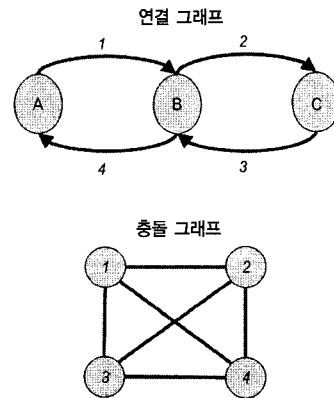
본 장에서는 Interference 와 충돌 그래프를 고려한 무선 메쉬 네트워크 성능 모델링과 최적화와 관련된 대표적인 논문들을 소개하고 좀 더 실용적이고 정확한 모델링과 최적화를 위한 필요한 사항들을 정리한다.

4.1 Impact of Interference on Multi-hop Wireless Networks

링크들 사이의 간섭과 충돌이 없는 유선 네트워크는 전통적인 maximum network flow problem (MAXFLOW) [West2001] 으로 모델링이 되며 Linear Programming 기법을 통하여 성능 최적화를 위한 라우팅 경로 결정, 링크 스케줄링 등이 가능 하다. 하지만 무선 네트워크에서는 무선 링크 사이의 interference 때문에 모델링과 성능 최적화가 어려워

진다.

2003년도 ACM MobiCom학회에 발표된 [Mobicom 2003Jain]에서는 충돌 그래프를 사용하여 interference를 모델링 하고 주어진 네트워크 토폴로지와 트래픽 요구 사항에서의 최적화된 성능의 하한선과 상한선 (lower bound and upper bound)을 계산하는 기법을 제안한다. 이 논문에서 정의 되는 충돌 그래프는 다음의 (그림 6)의 예제를 통해 설명할 수 있다. (그림 6)의 연결 그래프는 보는 바와 같이 3개의 노드 A,B,C 와 그들을 연결하는 4개의 방향성 무선링크 1,2,3,4 들로 이루어진 네트워크를 나타낸다. 이때 충돌 그래프는 연결 그래프의 각 무선링크를 노드로 나타내고 그 노드들 (무선링크들) 사이에 interference 가 있으면 해당 노드들을 링크로 연결한 그래프로 표현된다.



(그림 6) 충돌 그래프 예제

이때, [Mobicom2003Jain]에서는 interference를 정의하는데 있어서 carrier sensing에 의한 경쟁관계와 패킷 수신이 방해 받는 여부에 따른 간섭을 구분하지 않는다. 즉 임의의 2개의 링크가 carrier sensing에 의해서 동시에 활성화 (전송상태) 될 수 없는 경우와, carrier sensing 하지 않지만 동시에 활성화 되면 간섭에 의해서 최소한 두개의 링크 중에 하나의 전송이 실패하는 경우를 모두 interference라고 간주 하고 충돌 그래프에서 링크를 부여 한다. 그리고 충돌 그래프를 바탕으로 interference가 발생하지 않도록 동시에 활성화 될 수 있는 무선 링크들의 집합을 결정하면 완벽한 링크 스케줄러가 충돌이 발생하지 않도록 링크들을 활성화 시킨다고 가정

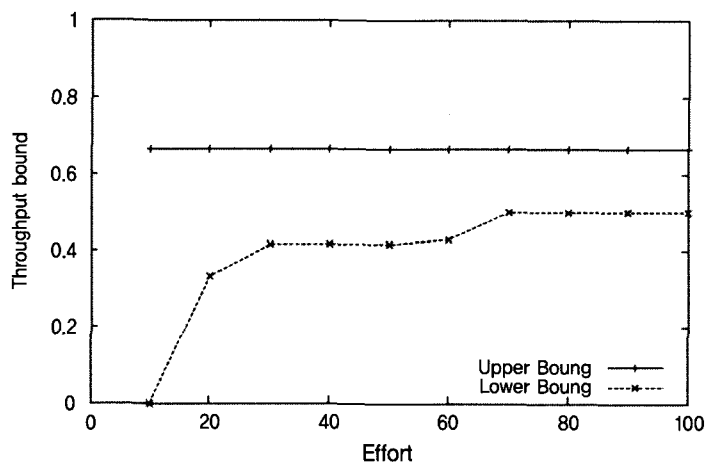
하였다.

충돌 그래프가 주어지면 충돌 그래프 상에 2가지 그래프 기법을 적용하여 네트워크 성능의 상한선과 하한선을 구해 나간다. 상한선을 구하기 위해서 충돌 그래프 상의 clique 을 찾는다. clique은 서로가 모두 링크로 연결되어 있는 노드들의 집합이다. 충돌 그래프 상의 링크는 interference 를 뜻하므로 같은 clique에 속한 노드들은 서로 interference를 주고 받는 관계로서 이들 중에 단 하나의 노드 (이에 해당하는 무선 링크)만 활성화 될 수 있다. 따라서 더 많은 clique 을 찾아서 MAXFLOW에 적용할수록 더 타이트한 (더 낮은, 더 정확한) 성능의 상한선을 구할 수 있다. 하지만 충돌 그래프 상에서 모든 clique을 찾는 것은 지수적인 시간 오버헤드를 요구하기 때문에 이 논문에서는 모든 clique을 찾는 대신 일정 수준의 clique만을 찾아서 네트워크 성능의 적당한 상한선을 구한다.

성능의 하한선을 구하기 위해서는 충돌 그래프 상의 independent set 을 찾는다. Independent set 에 속한 모든 노드들 사이에는 링크가 존재하지 않는다. 따라서 충돌 그래프 상의 independent set은 서로 충돌, 간섭하지 않는 노드들 (이에 해당하는 무선 링크들) 사이의 집합이고 이에 속한 노드들은 interference 없이 동시에 활성화 될 수 있는 있다. 그러므로 더 많은 independent set을 찾아서 MAXFLOW에 적용할수록 더 타이트한 (더 높은) 성능 하한선을 구할 수 있다. 만일 어느 수준의 clique과 independent set을 찾았

을 때 성능 상한선과 하한선이 일치한다면 그때의 일치하는 점이 네트워크 성능의 최적값이다. 하지만 clique을 찾는 문제와 유사하게 모든 independent set을 찾는 것은 지수적인 시간 오버헤드를 요구하는 NP complete 문제이며, 계산 시간 오버헤드와 최적의 성능을 보이는 링크 스케줄링과 라우팅 경로를 구하는 것은 서로 tradeoff 관계가 있다. 따라서 아래 (그림 7)에서 보는 바와 같이 일정 수준의 계산 시간 노력을 투자해서 상한선과 하한선이 적당히 근접하는 지점의 성능에서 만족할 수 있다.

이 논문의 한계점으로 1) MAXFLOW 문제에 대한 최적의 솔루션을 구하는 것에 대한 보장이 없다는 것과 2) 완벽한, 그러나IEEE802.11과 같은 분산형 CSMA/CA (Carrier Sensing Multiple Access, Collision Avoidance) MAC 프로토콜에서는 불가능한, 링크 스케줄러를 가정했다는 점을 들 수 있다. 이 논문에서 모델링하는 수준의 Linear Programming 자체가 솔루션을 찾는 데 오랜 시간이 소요되고 충돌 그래프에서 모든 independent set을 찾는 것 자체가 NP complete문제가이기 때문에 최적의 솔루션을 찾을 수 없는 한계점은 이 논문만의 한계점이 아니라 무선 멀티홉 네트워크 모델링 및 최적화 문제 자체의 한계점이다. 하지만 이 논문에서는 다항식 시간의 (polynomial time) 근사 알고리즘 (approximation algorithm)이 제안되지 않았기 때문에 최적 성능에 근접한 솔루션을 보장 할 수 없다는 단점이 있다.



(그림 7) 계산 노력에 따른 성능 상한과 하한선의 변화

4.2 Characterizing Achievable Rates in Multi-hop Wireless Networks

앞서 소개된 [Mobicom2003Jain]와 같은 학회에 소개된 논문[Mobicom2003Kodi]은 [Mobicom2003Jain]의 2가지 한계점 - 불가능한 링크 스케줄러의 가정 및 다항식 시간의 근사 알고리즘의 부재 -을 극복한 기법을 제안하고 있다.

[Mobicom2003Kodi]의 저자들은 링크 스케줄링 문제를 그래프 이론의 edge coloring 문제로 매핑하여 다항식 시간의 근사 알고리즘을 제안하였다. 또한 Edge coloring 이론에 근거하여 제안된 알고리즘의 솔루션이 최적 솔루션의 2/3 이내임을 증명하였고 시뮬레이션 결과 제안된 알고리즘의 성능이 최적 솔루션에 근접함을 보였다. 하지만, 활성화된 링크의 전송노드와 수신노드의 이웃 노드들만 silent 하면 충돌이 발생하지 않는다는 단순한 interference 모델을 사용하고 있으며, [Mobicom2003Jain]에 비해서 interference를 다루는 계산 비용이 적게 소요된다. 하지만 이 단순한 모델은 hidden interference를 표현할 수 없는 등 확장성이 떨어지며 따라서 멀티 홉 메시 네트워크에서는 적합하지 않다.

[Mobicom2003Kodi]의 저자들은 2005년 MobiCom에 발표한 [Mobicom2005Kodi]에서 [Mobicom2003Jain]을 확장하여 다중 채널, 다중 라디오 인터페이스를 사용한 메시 네트워크를 모델링 하였다.

4.3 Modeling Per-Flow Throughput

앞서 언급된 2개의 논문들은 완벽한 링크 스케줄러를 가정하거나[Mobicom2003Jain] 링크 스케줄이 계산되었을 때 이를 완벽하게 (충돌이 없도록) 구현 가능한 TDMA 방식의 MAC을 가정[Mobicom2003Kodi] 하고 있다. 하지만 이러한 가정들은 현재 가장 기본에 되는 IEEE802.11과 같은 CSMA/CA(Carrier Sensing Multiple Access / Collision Avoidance) MAC 프로토콜과 배치된다. CSMA/CA MAC 프로토콜은 원래 하나의 무선hop에서 괜찮은 성능을 보이나, 멀티 홉 메시 네트워크에서는 급격한 성능저하를 보인다. 그 이유는 앞서 설명한 Interference와 Carrier Sensing mechanism 때문인데, 이 요소들은 앞선 4.1 4.2 절에서 살펴본 바와 같이 네트워크 성능 모델링을 어렵게 하는 요소이기도 하다.

CSMA/CA 방식의 프로토콜을 사용하는 멀티 홉 무선 네트

워크에서는 자원을 공유하는 flow 사이에서 심각한 수준의 throughput 불평등 현상이 발생할 수 있다고 잘 알려져 있다. Rice University, E. W. Knightly 교수 연구진의 논문 [Infocom2006]에서는 불평등한 throughput 분배 현상의 근본 원인이 CSMA(Carrier Sense Multiple Access) 방식의 임의 접근 프로토콜의 근본적인 특성이란 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 메시 네트워크에서의 쓰루풋 불평등 문제를 고려한 좀더 합리적인 MAC, 네트워크 프로토콜을 디자인할 수 있다고 주장한다.

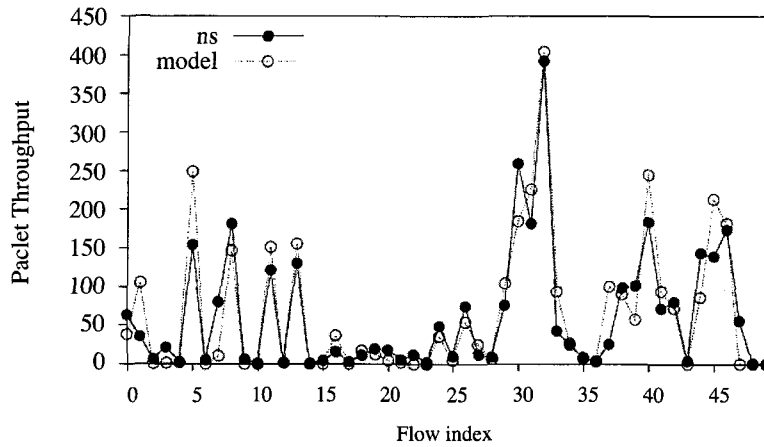
이 논문 [Infocom2006]에서는 싱글홉 액세스 네트워크에서의 802.11 DCF 성능 분석의 초석을 제공한 [JSAC2000] 큐잉 모델을 멀티홉 네트워크에서 단일 링크 (flow)의 성능 분석이 가능하도록 확장하였다. [JSAC2000]이 Hidden node가 존재하지 않는 싱글 홉 네트워크의 성능을 모델링 한 반면 [Infocom2006]에서는 일반적인 멀티 홉 혹은 메시 토폴로지 상에서 임의의 링크의 per-flow throughput을 모델링 하였다. 이를 위해서 노드들 간의 carrier sensing 관계를 그래프 이론의 Maximal clique 분석을 사용하여 표현하고 멀티 홉 상황에서 hidden interference를 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 [Infocom2006]에서 제안한 이 모델은 정확한 계산을 위해 상당한 계산 복잡도가 수반된다. 더 나아가 각 flow의 성능을 모델링 한 것이기 때문에 특정 트래픽 요구사항을 만족시키면서 전체 네트워크의 성능을 최대화 또는 최적화 하는 문제는 다루고 있지 않다.

4.4 새로운 성능 모델링&최적화 기법의 요구사항

살펴 본 바와 같이 IEEE802.11과 같은 CSMA/CA 프로토콜을 사용하는 멀티홉 메시 네트워크의 성능을 정확하게 모델링하고 성능을 최적화 하는 것은 쉽지 않은 작업이다. 하지

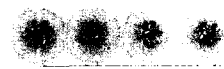


(그림 8) Flow throughput의 모델링과 시뮬레이션 비교

만 고속의 무선 네트워크 서비스를 안정적으로 제공하기 위해서 메쉬 네트워크 모델링과 성능 최적화 연구는 계속될 것이다. 효과적인 메쉬 네트워크 관리를 위해서 성능 모델링과 최적화 기법이 갖추어야 할 요구 조건을 정리하면 다음과 같다.

- Carrier sensing, hidden interference, DATA-ACK 충돌, flow간 쓰루풋 불평등과 같은 멀티홉 메쉬에서의 CSMA/CA MAC 프로토콜 특성이 반영되어야 한다. 논문 [Infocom2006]이 가장 근접한 모델링을 제안하였으나 성능 최적화 기법을 제시하고 있지는 않다.
- 대부분의 모델링과 달리 실제 무선망의 링크들은 비대칭적인 성능을 보이는 경우가 많다. 본 연구진의 [SECON2007]에서 보고된 바와 같이 두 링크 사이의 interference 관계 뿐 아니라 두 노드 사이의 carrier sensing 관계도 비대칭인 경우 (두 노드중에 한 노드만 상대방 노드를 sensing 하는 경우, HP 연구소 테스트베드에서 전체의 17%의 노드 쌍에서 발견)가 종종 발생하기 때문에 이를 모델링에서 반영해야 한다.
- 높은 수준의 성능 향상을 위해서 메쉬 네트워크에서 다수의 라디오 카드와 다수의 채널을 활용해야 할 필요성이 커지고 있다. 따라서 멀티채널, 멀티라디오 환경을 모델링 하고 채널할당 문제를 해결할 수 있어야 한다.
- 효과적인 네트워크 관리를 수행하기 위해서는 네트워크 토폴로지와 사용자의 트래픽 요구 패턴이 주어졌을 때

성능을 최적화 하기 위한 결정들을 바로 내려야 한다. 따라서 계산 복잡도, 오버헤드와 성능 최적화 사이에 tradeoff 를 조절 할 수 있는 성능 최적화 근사 알고리즘이 필요하다.



[COMNET2005] Ian Akyildiz, Xudong Wang, Weilin Wang, "Wireless Mesh Networks: A Survey," Elsevier Computer Networks, Vol. 47, No. 4, pp. 445-487, Mar. 2005.

[IMC2005] 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.

[Infocom2006] 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.

[JSAC2000] 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.

[SECON2007] Jeongkeun Lee, Sung-Ju Lee, Wonho Kim, Daehyung Jo, Taekyoung Kwon, and Yanghee Choi, "Comprehending the Effects of Carrier Sensing on Link Interference in Wireless Mesh Networks" to appear in Proc. of the IEEE SECON 2007, San Diego, California, Jun 2007.

[INFOCOM2005] G. Zhou, T. He, J. A. Stankovic, and T. F. Abdelzaher, "RID:Radio Interference Detection in Wireless Sensor Networks," in Proc. IEEE INFOCOM, Miami, FL, USA, Mar. 2005.

[TIT2000] P. Gupta and P. R. Kumar. "The Capacity of Wireless Networks," IEEE Transactions on Information Theory, 46(2):388-404, March 2000.

[Mobicom2003Jain] K. Jain, J. Padhye, V. Padmanadhan, and L. Qiu, "Impact of Interference on Multi-hop Wireless Network Performance," In Proc. of ACM MobiCom 2003, San Diego, CA, Sep., 2003.

[West2001] D. G. West, Introduction to Graph Theory, Chapter 4.3, Prentice Hall, 2001.

[ICNP2004] A. Kochut, A. Vasan, A. Shankar, and A. Agrawala. "Sniffing out the correct physical layer capture model in 802.11b," In Proc. IEEE ICNP, Berlin, Germany, Oct. 2004.

[Mobicom2003Kodi] M. Kodialam and T. Nandagopal, "Characterizing achievable rates in multi-hop wireless networks: The joint routing and scheduling problem," In Proc. of ACM MobiCom 2003, San Diego, CA, Sep., 2003.

[Mobicom2005Kodi] M. Kodialam and T. Nandagopal, "Characterizing the Capacity Region in Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks," In Proc. of ACM MobiCom 2005, Cologne, Germany, Sep. 2005.

약 력



1993년 서울대 컴퓨터공학과 학사
1995년 서울대 컴퓨터공학과 석사
2000년 서울대 컴퓨터공학과 박사
2001년 UCLA 연구원
2003년 뉴욕시립대 연구원
2004년 ~ 현재 서울대 컴퓨터공학과 조교수

권 태 경



2001년 서울대학교 컴퓨터공학부 학사
2001년 ~ 현재 서울대학교 컴퓨터공학부 석박사 통합과정
2006년 HP Lab, USA 인턴

이 정 근



2001년 ~ 2003년 Tracknine 개발팀 근무
2003년 ~ 2005년 KEBT 자바카드개발팀 근무
2006년 서울대학교 컴퓨터공학부 학사
2006년 ~ 현재 서울대학교 멀티미디어&모바일통신 연구소 인턴

김 원 호

