

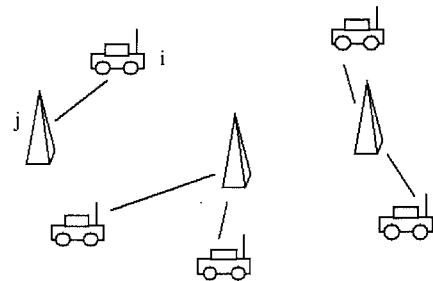
다중홉 무선망의 용량 및 계층간 최적화

김성륜 | 황 준

연세대학교

다중홉 무선망 (MWN, Multihop wireless network)에 관한 연구는 최근에 무선 적응망 (Wireless ad-hoc network), 센서망 (Sensor network), 그리고 다중홉 셀룰러망 (Multihop cellular network)등의 분야에서 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다. 그중에서도 특히, 경로 선택 (Routing), 에너지 효율성 (Energy-efficiency), 이동성 (Mobility)등이 MWN의 용량 (bits/hertz)과 어떤 관계가 있는지에 대한 이론적인 연구가 활발하게 진행되고 있다. 관련하여, 이와 같은 이론적인 연구를 검증하기 위해서, 다양한 MWN 테스트베드 (Testbed)가 국내외 연구자들에 의해서 구축이 되고 있다. 본 논문에서는 MWN의 용량에, 어떤 요인들이 영향을 미치는지를 살펴보고, 물리계층과 MAC계층을 중심으로 관련된 계층 최적화 (Cross-layer optimization) 문제를 언급하여, MWN의 용량이 어떻게 향상될 수 있는지를 살펴보기로 한다.

다수의 송신기 (Transmitter)와 여기에 대응하는 다수의 수신기 (Receiver)가 무선으로 통신하는 무선망 (Wireless



(그림 1) 셀룰러 이동통신망

network)의 용량 (Capacity, bits/hertz)은 여러 가지 방법으로 측정된다. 그중의 한 예를 들기 위해서, 대표적인 무선망인 셀룰러 이동통신망 (Cellular network)을 살펴보자. (그림 1)은 5개의 이동국 (Mobile station)이 3개의 기지국 (Base station)에 접속을 하고 있는 이동통신망을 나타내고 있다. 보다 일반적으로 M 개의 이동국이 존재하는 이동통신망을 생각해보자. 이때 i 번째 이동국은 편의상 i 번째 기지국과 통신한다고 가정하자.¹⁾ 이때 i 번째 이동국의 순간 송신 파워 (Transmission power)를 p_i 라고 하고, 이 이동국과 i 번째 기지국간의 채널 이득 (Channel gain)을 g_{ii} 로 나타내보자. 일반적으로 g_{ij} 는 j 번째 이동국에서 i 번째 기지국으로의 채널 이득을 나타낸다고 가정하자. 이때 i 번째 이동국이 통신하는 i 번째 기지국에서의 SINR (신호대간섭비)는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

¹⁾ 물론 하나의 기지국에 여러개의 이동국이 접속하고 있는 경우가 있겠지만, 이 경우는 같은 위치에 있는 동일한 기지국을 가상적 (virtually) 으로 여러개를 설정해서, 각각의 이동국과 통신하는 기지국을 1:1로 가정할 수 있다.

$$\Gamma_i(p) = \frac{g_{ii}P_i}{\sum_{\substack{j=1, \dots, M \\ j \neq i}} \theta_{ij}g_{ij}P_j + v_i} \geq \gamma_i^{(k)} \quad (1)$$

위에서 v_i 는 i 번째 기지국 수신기에서의 열잡음 밀도 (Thermal noise density)를 나타내고, θ_{ij} 는 i 번째 이동국이 사용하는 무선 채널 i 와 j 번째 이동국이 사용하는 무선 채널 j 간의 직교성 (Orthogonality)을 나타내는 일종의 파라미터로서 0과 1사이의 값을 갖는다고 가정한다. 이때 θ_{ij} 가 0인 경우는 두 채널간에 완벽한 직교를 의미하며, 1인 경우는 두 채널이 동일하여 최대의 채널 간섭 (Cochannel interference)이 존재하게 된다. 따라서 위 SINR식의 분모에서 첫 번째 항은 이동통신망에서 i 이외의 다른 이동국에서 발생하는 채널 간섭을 나타내고 있다. 이동국과 기지국간에는 다양한 전송 속도를 유지할 수 있고, 이때 이동국이 시스템에서 정의하는 k 번째 전송 속도를 유지하기 위해서는 기지국에서의 수신 SINR이 최소한 $\gamma_i^{(k)}$ (dB) 이상이어야 한다고 가정하자.

위와 같은 모델을 가지고 주어진 이동통신망의 용량을 계산하는 예를 들어보자. 먼저 각각의 이동국이 원하는 전송 속도가 있고, 여기에 해당하는 최소 수신 SINR이 위와 같이 $\gamma_i^{(k)}$ 로 모든 이동국에 주어졌다고 가정을 해보자. 이때 이동국은 최소의 송신 파워로 전송 속도를 실현하면 되므로, 수신 SINR이 정확히 $\gamma_i^{(k)}$ 가 되도록 전력을 제어 (Power control)할 것이다. 이때 “각각의 이동국은 구체적으로 어떤 송신 파워를 사용해야할까?” 이 질문에 대한 대답은 위 (1)번식의 부등호 (Inequality)를 등호 (Equality)로 바꾸어서, 각각의 이동국 파워 $P = (p_1, p_2, \dots, p_M)$ 에 대한 선형 등식 (Linear equation system)을 풀면 된다. 이때 계산된 이동국 송신 파워는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_M) \geq 0 \quad (2)$$

주어진 $\gamma_i^{(k)}$ 에 대해서 위 (2)의 조건을 만족하지 않는다면, 해당되는 전송 속도를 모든 이동국이 유지할 수는 없게 된다.²⁾ 그렇다면 “주어진 $\gamma_i^{(k)}$ 를 만족하는 이동국 파워가 (2)의 조건을 만족하는지 여부를 어떻게 판단 할 수 있을까?” 이를 위해서 H 라는 $M \times M$ 정방 행렬 (Square matrix)을 다음과 같이 정의해보자.

$$H = \begin{cases} h_{ii} = 0 \\ h_{ij} = \gamma_i^{(k)} \frac{\theta_{ij}g_{ij}}{g_{ii}} \end{cases} \quad (3)$$

이때 H 행렬의 Eigenvalue중 그것의 절대값 (Magnitude)이 가장 큰 Eigenvalue의 절대값을 H 행렬의 Radius라 하고, 이를 $\rho(H)$ 로 표기한다면, 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다³⁾ ([1], [2]).

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_M) \geq 0 \text{ if and only if } \rho(H) < 1 \quad (4)$$

따라서, $\rho(H)$ 의 계산을 통해서 주어진 $\gamma_i^{(k)}$ (즉, 이동국 전송 속도)가 만족될 수 있는지의 여부를 판단할 수 있다. 통상적으로 $H_1 \geq H_2 \geq 0$ 인 두 행렬 H_1 과 H_2 사이에 $\rho(H_1) \geq \rho(H_2)$ 의 관계가 성립하므로, 요구되는 SINR ($\gamma_i^{(k)}$)이 클수록, 인접 이동국간의 간섭 ($\theta_{ij}g_{ij}$)이 클수록, 그리고 통신하는 기지국과의 채널 이득 (g_{ii})이 작을수록 $\rho(H)$ 는 증가하고, 이 값이 1을 넘어서는 순간 요구되는 SINR ($\gamma_i^{(k)}$)을 만족하는 이동국 송신 파워 $P = (p_1, p_2, \dots, p_M) \geq 0$ 가 존재하지 않는다.

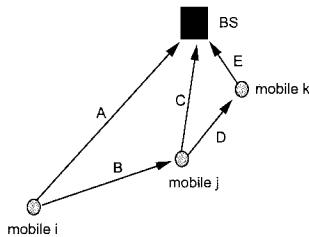
이와 같은 이유로 $\rho(H)$ 는 주어진 셀룰러 이동통신망의 용량을 측정하는 중요한 기준으로 사용되고 있으며, 이를 바탕으로 이동통신망의 무선자원관리 (Radio resource management)의 중요한 기능인 혼잡 제어 (Congestion control) 혹은 호 수락 제어 (Call admission control)가 설계되고 있다 [1].

지금까지는 송신기와 수신기 사이에 증계 (Relay)를 담당하는 어떤 증계 노드 (Relay node)도 존재하지 않는 경우를 가정하였다. 지금부터는 (그림 2)의 예와 같이 이동국과 기지국 사이에 또 다른 이동국이 존재하여 이 이동국이 다른 이동국의 전송 중간에 일종의 증계를 담당하는 경우를 생각해 보도록 하겠다 [3], [4].⁴⁾ 이와 같은 다중홉 통신 (Multihop

²⁾ 즉, 일부 이동국은 시스템에서 제거 (Removal)되어야 한다.

³⁾ Peron-Frobenius 정리에 의하면 H 와 같은 Nonnegative 이면서 Irreducible한 행렬의 $\rho(H)$ 는 H 의 Eigenvalue중 양의 실수값을 갖는 Eigenvalue와 동일하다.

communications)은 다중홉 셀룰러 이동통신 (Multihop cellular)뿐만아니라, 에드혹 망 (Ad-hoc network), 센서망 (Sensor network)과 같은 무선망에서 공통적으로 나타나고 있고, 여기서는 이를 통칭하여 다중홉 무선망 (MWN, Multihop wireless network)이라 하자.



(그림 2) 다중홉 셀룰러 이동통신망

(그림 2)에서 예를들어, 이동국 i 가 기지국을 향해 직접 전송하는 것 (A)에 비해서, 이동국 j 를 통해서 기지국으로 전송하는 경우 ($B \rightarrow C$) 어떤 장점이 있는지 파악해보자. 이때 만약 B링크와 C링크가 같은 채널을 사용하고 있다면, 이동국 j 는 시분할로 (TDD, Time Division Duplex) 이동국 i 로부터 패킷을 먼저 받고, 이를 기지국에 전달해주게 된다. 이때 TDD로부터 발생하는 시간 지연은 B링크와 C링크가 A링크보다 고속으로 전송할 수 있는 무선 환경을 가지고 있다면, 충분히 보상이 된다고 할 수 있다[3]. 위 (그림 2)에서 이동국 j 는 다시 이동국 k 를 통해서 다중홉으로 전송이 가능하므로, 이동국 i 가 어떤 경로 (Route)를 선택하느냐는 복잡한 문제가 된다.

일반적으로 MWN에서 모든 이동국이 기지국까지의 최적의 경로와 홉을 결정하여, 기지국까지의 전송 속도를 최대화하거나 혹은 전송 전력을 최소화하는 문제 [5]는 일종의 조합 최적화 (Combinatorial optimization)문제가 된다. 다르게 표현하면, 가능한 모든 경로와 홉 전체를 조사해서 그중에서 가장 좋은 방안을 선택하는 것이다. 따라서, 효율적으로 최적해를 구하는 것은 어렵다고 할 수 있다. 결국, 각각의 이동국들에게 목표로하는 전송 속도가 있고, 이를 MWN에서 실현이 가능한지에 대한 판단은 조합 최적화 문제를 푸는 것만큼 복잡하다. Toumpis와 Goldsmith의 논문 [6]의 경

우 일종의 전체적인 조사 (Full enumeration)를 통해서 과연 MWN이 단일홉 통신에 비해서 얼마나 효과적인지를 증명하고 있다. 결론적으로 (그림 1)과 같은 단일홉 무선망에서와 같이 $\rho(H)$ 같은 기준이 존재하고, 이를 비교적 손쉽게 계산하여, “과연 요구되는 전송 속도를 이동국이 지원가능할 것인가?”의 판단이 MWN에서는 쉽지 않다.

그렇다면, “MWN에서는 어떻게 무선망의 용량 (bits/hertz)을 계산할 수 있을까?” 직접적인 계산보다는 정보 이론적 (Information-theoretic)인 접근 방법을 사용하여 MWN의 용량이 어떤 요인의 함수로 표현되어지는지를 판단하는 연구가 주를 이루었다고 할 수 있다. 즉, MWN의 용량이 어느 정도 되는지와 그것에 영향을 주는 요소가 무엇인지를 이론적으로 규명하는 것에 초점을 맞추어 왔다. 이와 같은 연구를 촉발시킨 것은 Gupta와 Kumar의 “The capacity of wireless networks” 논문 [7]이라는 것에 많은 연구자들이 동의하고 있다. 이 연구에서 저자들은 MWN을 가정하고, 주어진 공간에 일정 숫자 (n)의 송신 노드 (node, 혹은 셀룰러 이동통신망에서의 이동국)가 랜덤하게 존재하고, 관련하여 같은 숫자 만큼의 수신 노드가 랜덤하게 존재하는 경우에 대해서 분석하였다. 즉, 일정 공간의 MWN내에 n 개의 송수신 쌍이 존재하고, 추가적으로 이들은 모두 같은 무선 채널을 사용한다고 가정하였다. 이때, 1개의 송수신 쌍의 용량은 네트워크 내의 노드의 숫자 (n)에 대해서, $O\left(\frac{1}{\sqrt{n \log n}}\right)$ 의 함수로 나타난다는 것을 이론적으로 증명하였다. 즉, 노드의 숫자가 늘어날 때마다 오히려 송수신쌍 각각의 용량은 감소하는 현상을 보여주고 있다. 저자들은 노드의 숫자가 늘어날수록, 노드들은 간섭 (Interference) 때문에 가장 근접한 노드와 통신하는 것이 최적이라는 것을 증명했다. 주어진 공간에서 n 이 변화할 경우, 가장 가까운 노드까지의 거리가 $1/\sqrt{n}$ 에 비례한다는 것을 생각해 볼 때, 송신 노드에서 수신 노드까지 주어진 패킷을 전송하는데 \sqrt{n} 에 비례한 만큼의 홉 수가 증가하고, 이에 선행으로 비례해서 송신 노드와 수신 노드의 전송 지연 (Delay)이 결정된다. 결국은 송신 노드와 수신 노드 간의 평균 전송 속도는 $1/\sqrt{n}$ 에 비례해서 감소하게 된다.”

그런데, 노드들은 수시로 이동 (Mobility)하고 있고, 일단 근접한 노드로부터 데이터를 전송 받은 다음에, 이것을 망

본 논문에서 다루는 셀룰러 무선통신망의 경우 상향 링크 (Uplink)를 중심으로 기술했으나, 특별한 언급이 없는 한 대부분의 논의는 하향 링크 (Downlink)에도 적용이 된다.

내부에서 충분한 이동을 거친 후, 수신 노드 (Destination node)에 전달을 해주면 오히려 Gupta와 Kumar의 경우보다 전송 속도가 증가할 수 있다는 것을 증명한 것이 Grossglauser와 Tse의 “Mobility increases the capacity of ad-hoc wireless networks” [8]에 언급되어 있다. 이 논문에서 저자는 1개의 송수신 쌍의 용량은 노드의 숫자와는 상관이 없고 $O(1)$ 로 표현된다는 것을 주장하고 있다. 이는 Gupta & Kumar의 결과와 상반되는 것으로, MWN의 용량에 대한 일종 상한 (Upper bound)를 제시하고 있다고 판단된다. 하지만 Grossglauser와 Tse의 경우 노드간 데이터 전달 (Relay) 과정에서 생기는 지연은 전혀 고려하고 있지 않다. 일반적으로 전송 지연은 비실시간 데이터 전송에서 QoS를 측정하는 가장 중요한 단위임에도 Grossglauser와 Tse는 이것을 상당히 단순히 가정하고 있다. 그럼에도 불구하고, 노드의 이동성이 네트워크의 용량을 증진시킬 수 있다는 Grossglauser와 Tse의 메시지는 많은 연구자들에게 각인되어 있다. Grossglauser와 Tse이후에 많은 연구자들이 전송 지연과 MWN의 용량에 관한 논문을 발표해 오고 있다 [9]. 그러나, 아직도 MWN의 용량을 대변하는 공통적인 수학적 프레임워크 (Framework)는 존재하지 않고, 연구자들 사이에 논쟁만 지속되고 있다 [10].

Gupta와 Kumar, 그리고 Grossglauser와 Tse이후 많은 연구자들이 MWN의 용량을 계산하려는 시도가 있었지만, 결국 MWN의 용량은 $O\left(\frac{1}{\sqrt{n \log n}}\right)$ 과 $O(1)$ 사이 존재할 것이라 판단된다. 그러나, 위와 같은 연구에서 몇가지 중요한 점들이 간과되고 있다는 것을 언급하고 싶다.

Gupta와 Kumar는 노드의 숫자가 늘어날수록, 노드들은 간섭때문에 가장 근접한 노드와 통신한다고 주장하였다. 그런데 가장 가까운 노드와 통신을 하게될 경우, 송수신 노드 간 거리가 $1/\sqrt{n}$ 에 비례하고, 관련하여 SINR이 증가하게 된

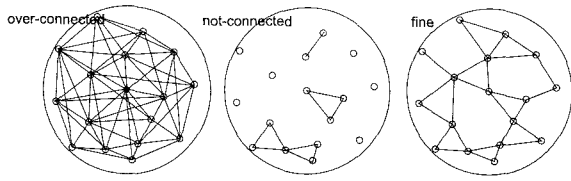
다. 이때 적응적 변복조 (Link adaptation)가 무선 링크에서 사용된다면, 홉 간의 전송 속도는 향상이 된다. 적응적 변복조가 사용이 되지 않는다 할지라도, 링크 계층(Link layer)에서 오류를 보정하기 위한 재전송 (Retransmission) 횟수가 감소하게 되어, 홉 간의 전송 속도는 SINR의 증가와 함께 향상된다. 따라서, 송수신 노드들간의 홉 수가 늘어나더라도, 홉 간의 전송 속도 향상으로 전체적인 전송 속도는 향상이 될 수도 있다. 이와 같은 점이 Gupta와 Kumar의 논문 및 이후의 여러 논문에서 간과되어 있다고 할 수 있다.

두번째로 Gupta와 Kumar의 논문에서 노드들은 전력 제어를 하지 않는다고 가정하고 있다. 즉, 모든 노드들은 일정한 송신 파워로 전송한다는 가정을 가지고 있다. 따라서 노드의 숫자가 늘어나면, 노드들간의 간섭은 증가하게 된다. 그런데, 만약 노드의 숫자가 증가하여 가까운 노드들과 통신을 하는 것이 최적이라 한다면, 가까운 노드들 사이에 굳이 높은 송신 파워로 전송을 할 필요가 없을 것이다. 이때는 송신 파워를 줄여서, 전체적인 간섭량을 줄여줘야 할 것이다 [10]. 이와 같이 최적으로 전력 제어를 했을 경우를, 미리 제거하였기 때문에, MWN의 용량이 낮게 계산되었다고 판단할 수 있다.

세번째로 MAC (Media Access Control)의 문제를 들 수 있다. Gupta와 Kumar 및 관련 논문에서는 MWN내의 모든 송신 노드 (n)가 동시에 전송한다는 것을 가정하고 있다. 그런데 이와같은 동시 전송 (Simultaneous transmission)은 반드시 전체적인 용량을 최대화시킨다고 할 수는 없다. 예를들어 전체 송신 노드의 50%는 짝수 슬롯에 전송하고, 나머지 50%는 홀수 슬롯에 전송하는 일종의 스케줄링 (Scheduling)을 적용한다면, 오히려 MWN의 전체적인 전송 속도는 향상될 수 있다. 이와 같은 현상은 송신 노드의 개수가 증가하여 노드의 밀도가 증가할 때, 더욱 확연하게 나타난다고 할 수 있다 [11].

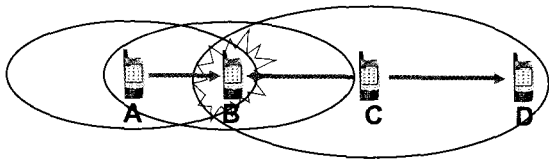
(그림 3)은 주어진 MWN에서 과연 몇 개의 노드가 동시에 전송하는 것이 최적인지를 표현하고 있다. 가장 왼쪽 그림은 모든 노드가 동시에 전송하는 경우로 링크간의 간섭으로 효율적이지 못하다. 가운데 그림은 너무 작은 숫자의 노드가 전송하여 노드간의 간섭은 없으나, 전체적으로 MWN의

_ Gupta와 Kumar는 시스템에서 사용하는 무선 채널의 Bandwidth를 W 로 설정하였으나, 여기서는 편의상 $W=1$ 이라고 가정하였다.



(그림 3) MWN에서의 송신 노드의 밀도 (Transmission node density)

용량이 높지 않다. 가장 오른쪽 그림은 최적의 송신 노드 밀도 (Optimal node density)를 나타내는 것으로, 예를 들어 짝수 슬롯에는 그림의 노드들이 전송을 하고, 홀수 슬롯에서는 나머지 노드들이 전송을 하는 스케줄링을 적용함으로써, 전체적인 MWN의 용량을 최대화시킬 수 있다. 이와 같은 분석은 Grossglauser와 Tse의 연구 [8]에서도 나타나는데, 이 연구에서 저자들은 송신 노드의 밀도를 변경해 가면서 최적의 송신 노드 밀도를 구하고 있다.



(그림 4) MWN에서의 MAC

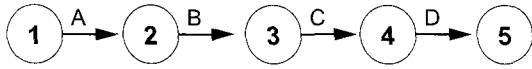
그렇다면, “최적의 송신 노드 밀도는 어떻게 결정되는가? 혹은 어떻게 실현할 수 있을까?” 이와 같은 질문에 대한 대답은 (그림 4)를 통해서 설명할 수 있다. (그림 4)는 4개의 노드가 존재하는 MWN을 나타내고 있다. 무선 링크의 경우 여러 시스템에서 CSMA/CA (Carrier sensing multiple access/collision avoidance)가 대표적인 MAC으로 사용되고 있다. 이 때, (그림 4)에서 A노드와 C노드는 상호 Carrier를 감지할 수 없어, 상호 존재를 알 수 없는 Hidden node problem에 직면하게 된다. 이와 같은 이유로 A 및 C가 동시에 B노드를 향해 전송하고, B 노드에서는 일종의 충돌 (Collision)이 일어나게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 수신 노드인 B는 송신 노드인 A와 C와 RTS (Request-to-Send) 및 CTS (Clear-to-Send) 패킷을 주고 받고, CTS를 받은 A혹은 C노드가 B노드를 향한 전송을 일시로 정지하게 된다. 이와 같은 보정 작업을 통해 Hidden node problem을

해결 할 수 있다.

그런데, (그림 4)에서 B노드가 높은 송신 파워로 CTS을 전송하여 멀리 떨어져 있는 D노드까지 CTS가 전달된다면, D노드 역시 일시로 전송을 중단하게 된다. 실제로 D노드의 전송 반경은 B노드에게 간섭을 줄 정도는 아니지만, B에서의 충돌 방지를 위해서 공격적으로 D노드의 전송을 일시 중지시켰다. 이는 D노드가 B노드의 CTS 전송 반경에 노출된 이유에 근거하는 것으로, 이를 Exposed node problem이라 통칭한다. Exposed node 문제는 MWN에서 많은 링크를 동시에 정지시킴으로서, 전체적인 End-to-end 전송 속도를 감소시킬 우려가 있다. 예를 들어 (그림 4) MWN에서 노드 A가 노드 D를 향해, TCP 패킷을 전송한다고 가정해보자. 이 과정에서 만약 노드 B의 링크가 Exposed node 문제로 인해 가끔씩 정지된다고 가정을 해보자. 이때, A에서 보낸 패킷이 노드 D에 지연되어 도착한다면, TCP의 에러 보정 작업에 의해서 A노드는 D노드를 향해서 같은 패킷을 재전송하게 된다. 따라서 Exposed node 문제는 멀티홉 환경에서 전송 속도를 감소시킬 수 있다는 것을 예측 할 수 있다. Xu와 Saadawi의 경우[12], 이와 같은 이유로 CSMA/CA를 기반하는 MWN이 Exposed node 문제로 인해 적합하지 않다는 결론을 내리고 있다. 특히 전송 계층 (Transport layer)에서 TCP를 사용하는 경우, 이와 같은 문제는 더욱 증폭된다고 결론을 내리고 있다.

그렇다면 “Exposed node 문제는 반드시 MWN의 환경에서 나쁜 영향만을 주는 것일까?” 이 질문에 대한 대답은 우리의 원래 문제인 “MWN에서 최적의 송신 노드 밀도는 어떻게 결정되는가? 혹은 어떻게 실현할 수 있을까?”에 대한 해결책과 밀접하게 연관되어 있다 [13]. 이를 위해서 (그림 5)를 살펴보자.

(그림 5)에서 노드 1에서 노드 5까지 패킷을 A, B, C, D 4개의 멀티홉으로 전송한다고 가정하자. 이때, 만약 노드 1이 노드 2를 향해 전송할 때 (즉, 링크 A가 활성화) “링크 C와 D는 전송을 멈추는 것이 링크 A의 수신 성능을 적절하게 유지시켜줄 것인가?” 만약 C와 D가 동시에 전송을 멈춘다면, 링크 A의 전송 속도는 향상될 수 있지만, D의 전송을 멈춤으로써 전체적인 End-to-end 전송 속도는 감소될 수 있다. 결국 노드 1의 CTS에 노드 3 혹은 노드 4가 노출이 되어야 하는지의 MAC의 문제로 귀결된다. 그런데, 이 문제는 주어



(그림 5) 선형 (Linear) MWN에서의 Exposed node 문제와 End-to-end 전송 속도 [13]

진 MWN에서 최적의 송신 노드 밀도를 결정하는 우리의 원래 문제와 동일한 것임을 알 수 있다. Exposed node 문제는 필요 이상의 많은 노드가 노출이 되었을 때 “문제”가 되는 것이지, 최적의 숫자만큼의 노드만이 노출된다면, 오히려 MAC을 통해서 최적의 송신 노드 밀도를 결정할 수 있다고 할 수 있다 [13].

(그림 5)에서 모든 무선 링크에서 적응적 변복조가 적용된다고 가정해보자. 이때, “링크 A의 전송 속도를 어떻게 설정해야 할까?” 만약 링크 A의 전송 속도가 높다면, 간섭량을 줄이기 위해서 많은 링크를 정지시켜야 할 것이다 (그림에서 B, C, D 링크 전체). 이와 같은 많은 링크의 일시 정지에 의한 전송 지연은 바람직하지 않을 수도 있다. 다른 한편으로, 만약 링크 A의 전송 속도를 너무 낮게 설정한다면, 그림에서 D링크를 A링크와 동시에 활성화시킬 수는 있겠지만, 링크의 절대 전송 속도 하락으로 전체적인 End-to-end 전송 속도 지연을 가져올 수 있다.

그렇다면 위와 같은 MWN에서 “최적의 전송 속도와 동시에 최적의 송신 노드 밀도는 무엇인가?” 이 문제는 물리계층 (Physical layer)과 MAC 계층에서 계층간 최적화 (Cross-layer optimization)를 통해서 이루어져야하고, 물리계층의 경우 링크의 전송 속도를 그리고 MAC 계층의 경우 최적의 송신 노드 밀도를 결정하게 된다 [14], [15]. 이와 같은 연구에 대한 실증적인 결과는 다음절에 언급하기로 한다.

본 절에서는 MWN에서 각각의 노드가 IEEE 802.11 표준을 따르고, (그림 5)처럼 선형으로 배치되어 있는 경우에 앞 절에서 언급한 계층간 최적화를 모의 실험한 결과에 대하여 기술하고자 한다. 즉, 노드(Source node)에서 중간중간의 중계

노드들 (Intermediate relay nodes)을 지나 목적지 노드 (Destination node)로 패킷을 보내는 상황에서, 동시 전송하는 노드들의 on/off를 통하여 각각의 수신 노드가 받게 되는 간섭 전력의 세기를 조절하여 종단간 전송 속도 (end-to-end throughput)를 어떻게 향상시킬 수 있을지를 다루고 있다.

소위 무선 랜 (Wireless LAN)이라고 불리는 IEEE 802.11 계열의 통신 표준들은 각 노드 및 AP (Access point)가, 서로 정해진 동일한 주파수 대역을 사용하자고 약속함으로써 하나의 네트워크 구성원으로 서로를 인식하게 되며, 이때부터 데이터 및 제어 패킷을 주고받게 된다. 이 표준은 무선 매체의 공유시 발생할 수 있는 수신 노드에서의 전파 충돌을 피하기 위하여, CSMA/CA MAC 방식을 쓰고 있다. 이 방식은 물리적 전송 주파수 감지 (Physical carrier sensing)를 통하여 다른 노드로 전송하기를 원하는 노드는 전송하기 전에, 매체 상에 다른 전송이 현재 이루어지고 있는지를 확인하게 된다. 한편 수신 노드에서는 수신된 SINR이 특정 목표치보다 클 경우에 하나의 무선 연결 (Wireless link)이 성공적으로 완성된다. 그렇지 않을 경우, 전송 실패가 되고, 수신노드의 반응이 특정시간동안 없을 경우, 전송노드는 time-out으로 간주하고 Binary exponential random backoff에 의하여 임의의 시간만큼 기다린 후 다시 재전송 하게 된다.

전송 주파수 감지 영역이 상대적으로 길면, 동시에 전송하는 단말들이 상대적으로 멀리 떨어지게 되어, 그에 따른 간섭 전력이 줄어들게 된다. 이 점은 각 링크의 전송시 그 성공 확률을 높이는 효과가 있다. 하지만, 각 무선 링크의 활성화도 (Link activity factor)를 저하시켜 전체적인 End-to-end 전송 속도를 감소시킬 우려가 있다. 한편, 각 노드의 목표 SINR이 높다면 한번 전송 성공시 상대적으로 많은 양의 데이터를 전송할 수 있지만, 전송 실패로 인한 재전송 횟수가 늘어나 전송 속도를 저하시킬 가능성도 존재한다.

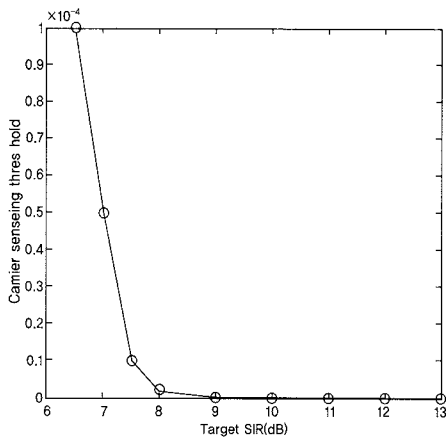
이를 확인하기 위해서 NS-2 (2.29버전) 시뮬레이터를 이용하여 모의실험을 하였다. 현재 배포되고 있는 NS-2는 수신 노드가 SNR (신호대잡음비)만을 검사하여, 그 값이 특정 임계값을 넘으면 수신을 시작하는, 단일 전송시의 매체접근 제어 방식이 반영되어 있다. 그러나 검증하고자 하는 본 연구의 환경은 복수개의 노드가 동시 전송하는 경우이므로, 복수개의 수신 신호중 간섭이 아닌 신호만 뽑아내어 그 값들로 SINR (신호대간섭비)를 계산하고, 이것이 원하는 목표치

를 넘을 경우 수신을 시작하는 형태로 NS-2 소스 코드를 변경하였다. 이러한 수정을 통하여, 우리는 최적의 전송 주파수 감지 영역 및 링크간 전달속도가 최대의 수율을 보장할 수 있다는 것을 확인하였다. 15개의 단말을 50 미터 간격으로 선형 배치하고 다음의 인자들로 네트워크를 구성하여 15초간의 실험을 진행하였다.

〈표 1〉 NS-2 시뮬레이션 파라미터

전송파워	0.012(Watt)
열잡음	$1.162e^{-12}$
RTS/CTS	사용안함
소통량(Traffic) 모델	Constant Bit Rate
CBR 간격	3.75(ms)
CBR 패킷 크기	210 byte
전송계층(Transport Layer)	UDP
UDP 패킷 크기	1000
최초 경쟁 윈도우(CW) 크기	31
짧은 재전송 시도 한계횟수(Short Retry Limit)	7
긴 재전송 시도 한계횟수(Long Retry Limit)	4
전송 모델	Two-way ground
안테나 높이	1.5(m)
라우팅 알고리즘	DSR

우선 목표 SINR을 6부터 13(dB)까지 변화시키며, 그때마다, 최적의 성능을 내는 전송주파수 감지 임계값을 나타내 보면, (그림 6)과 같다. 각각의 목표 SINR에서 최적의 전송 주파수 감지 임계값이 선택되었을 때, 15개의 노드로 구성된 선형 MWN의 End-to-end 전송 속도를 실험으로 구해 보았다. (그림 7)에서 보는 바와 같이, 최적의 End-to-end 전송 속도는 SINR 8dB에서 성취되고, 관련된 전송 주파수 감지

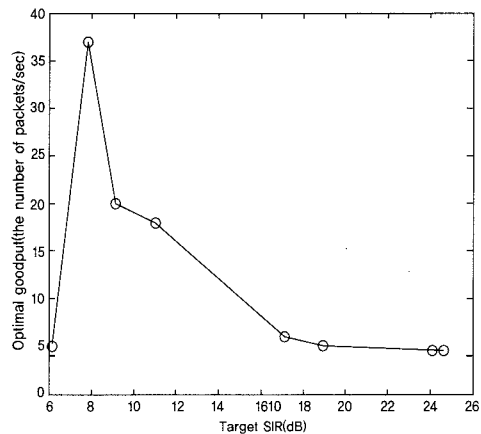


(그림 6) 선형 MWN에서 목표 SINR과 최적 전송주파수 감지 임계값 (NS-2 시뮬레이션)

임계값이 최적의 동시 전송 노드 밀도를 결정한다고 할 수 있다.

MWN의 용량에 관한 연구는 주로 컴퓨터 네트워크 (Computer network)의 무선화 측면 (Wireless)에서 주로 연구되어 왔다. 특히 최근에 WLAN 분야의 활성화로, 이와 같은 연구 추세가 최근 수년동안 지속되었다. 특히 표준화와 관련해서 MWN에 관한 연구는 IEEE 802.11, 802.16, 802.15, 802.20에서 표준화의 일환으로 다양한 각도에서 활발하게 진행되고 있다. 그런데, MWN은 근본적으로 무선망임에도 불구하고 최근까지의 연구가 무선 부분에 대한 고려가 미흡하여, 그 결과의 완성도가 완벽하다고 판단되지는 않는다. 이와 같은 관점에, 본 논문에서는 MWN의 용량에 미치는 요인을, 적응적 변복조, 전력제어 및 MAC의 관점에서 서술하였다. 특히 Gupta와 Kumar의 연구를 중심으로 위 요인들이 MWN의 용량에 미치는 영향을 서술하였다.

MWN의 이론적인 용량 분석은 Gupta와 Kumar에서 간과한 위 요소들을 고려하여 이루어져야 한다고 판단된다. 물론 그것의 복잡성은 어느 정도 예상되지만, 보다 현실적인 가정을 바탕으로 한 이론적인 용량 연구가 필요하다고 판단된다[10].



(그림 7) 선형 MWN에서 목표 SINR과 End-to-End 전송 속도 (NS-2 시뮬레이션)

근본적으로 NWN를 통해서 무선 자원 (Radio Resource)을 보다 효율적으로 사용하게 되고, 결과적으로 망의 효율 (bits/hertz/watt)을 증진시킬 수 있는 방안을 찾아가야 할 것이다. 이와 같은 노력의 한 예로 본 연구에서는 MWN에서의 계층간 최적화의 예를 기술하고 있다. 그러나 아직도 많은 문제들이 MWN에서 충분히 해결되고 있지 않아, 연구자들의 도전이 필요하다고 하겠다.

참 고 문 헌

1. J. Zander and S.-L. Kim, Radio Resource Management in Wireless Networks, Artech House, Boston & London, March, 2001.
2. F. Berggren and S.-L. Kim, "Energy-Efficient Control of Rate and Power in DS-CDMA Systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 3 (3), pp. 725-733, 2004.
3. Y. Choi, S.-L. Kim and S. Kim, "On the Multihop Packet Scheduling in Uplink DS-CDMA Systems," IEICE Transactions Communications, Vol. E89-B (8), pp. 2249-2253, 2006.
4. M.-H. Ryu and S.-L. Kim, "Path Available Time and Power Consumption of a Multihop Transmission with Random Mobility," a book chapter, "Performance Analysis of Mobile Ad Hoc Networks," Nova Science Publishers, USA, 2006.
5. R. Jantti and S.-L. Kim, "Joint Data Rate and Power Allocation for Lifetime Maximization in Interference Limited Ad Hoc Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 5 (5), pp. 1086-1094, 2006.
6. S. Toumpis and A. J. Goldsmith, "Capacity Regions for Wireless Ad Hoc Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 2 (4), pp. 736-748, 2003.
7. P. Gupta and P. R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 46 (2), pp. 388-404, 2000.
8. M. Grossglauser and D. N. C. Tse, "Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 10 (4), pp. 477 - 486, 2002.
9. A. El, Gamal, J. Mammen and B. Prabhakar, and D. Shah, "Throughput-delay Trade-off in Wireless Networks," Proc. IEEE INFOCOM, 2004.
10. Y. J. Hwang, S.-L. Kim and R. Jantti, "On the Capacity of Wireless Multihop Networks," submitted for publication, 2006.
11. T. S. Kim and S.-L. Kim, "Random Power Control in Wireless Ad Hoc Networks," IEEE Communications Letters, Vol. 9 (12), pp. 1046-1048, 2005.
12. S. Xu and T. Saadawi "Does the IEEE 802.11 MAC Protocol Work Well in Multihop Wireless Ad Hoc Networks?," IEEE Communications Magazine, Vol 39 (6), pp. 130-137, 2001.
13. R. Jantti, J. Mo and S.-L. Kim, "On Multihop Capacity Gain and Media Access Control in a Wireless Network," submitted for publication, 2006.
14. J. Hwang and S.-L. Kim, "A Cross-layer Optimization of IEEE 802.11 MAC for Wireless Multihop Networks," IEEE Communications Letters, Vol. 10 (7), pp. 531 - 533, 2006.
15. J. Hwang and S.-L. Kim, "Cross-layer Optimization and Network Coding in CSMA/CA based Wireless Multihop Networks," submitted for publication, 2006.



김 성 루

1988년 서울대학교 경제학사
 1990년 KAIST 공학석사
 1994년 KAIST 공학박사
 1994년 ~ 1998년 ETRI 선임연구원
 1998년 ~ 2000년 Royal Institute of Technology (KTH), 조교수
 2000년 ~ 2004년 한국정보통신대학교 (ICU), 조교수 및 부교수
 현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수 및 정교수
 관심분야: 무선 자원 관리 및 최적화, 정보 이론



황 준

2002년 연세대학교 기계전자공학부 공학사
 2004년 연세대학교 전기전자공학과 공학석사
 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 관심분야: 무선 멀티 홉 네트워크 용량 및 계층간 최적화, 네트워크 코딩