

MMR(Mobile Multihop Relay) 시스템의 용량 분석

이강원^{1*} · 국광호¹ · 최승인²

¹서울산업대학교 산업정보시스템공학과 / ²한국전자통신연구원

Capacity Analysis of MMR(Mobile Multihop Relay) System

Kang Won Lee¹ · Kwang Ho Kook¹ · Song In Choi²

¹Department of Industrial and Information Systems Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743

²Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon, 305-700

This study shows achievable capacity gain from the MMR system. Relay stations are placed along the cell boundary in tiers. We can have as many tiers of relays and as many relays in each tier as we want. A model is developed, which can estimate the system capacity varying the number of relays in each tier and the bandwidths allocated to the BS and the RS. It is shown that maximum capacity increases are 21.5% and 18.9% when we have relays in the first tier only and in the first and the second tiers, respectively.

Keyword: relay station, multihop mobile relay(MMR), uniform throughput

1. 서론

현재 표준화가 진행 중인 3G LTE, IEEE 802.16, 802.20 등 다수의 차세대 이동통신 시스템의 공통적인 개발 목표는 향상된 데이터 전송속도이다. 이를 구현하기 위해 OFDM, MIMO, 스마트 안테나 등의 최신기술 등이 도입될 것으로 예상된다. 그러나 다음의 두 가지 이유로 인해 높은 전송속도의 구현은 쉽지 않아 보인다. 첫째, 차세대 이동통신 시스템에서 요구하는 높은 전송속도 문제이다. 제한된 송신 전력 하에서 높은 전송속도는 낮은 Eb/No를 가지게 하여 오류율을 증가시키고, 전송 가능 거리를 줄어든다. 둘째, 차세대 이동통신 시스템에 할당될 주파수대역은 기존의 이동통신 시스템에서 사용 중인 2GHz 대역보다 훨씬 높은 2-6GHz 일 것으로 예측된다. 이 대역에서 무선 propagation은 도심지역의 이동통신에서 자주 발생하는 non-line-of-sight 상황에 아주 취약하기 때문에 도심 지역의 음영지역(shadow zone)이 증가할 것으로 보인다.

위의 두 가지 문제점들을 해결하는 가장 손쉬운 방법은 기지국의 숫자를 많이 증가시키는 것인데 여기에 소요되는 막대

한 설치비용 때문에 이 방법은 가입자들의 수요가 이 비용을 감당할 수 있을 정도로 증가할 때에만 가능해 보인다. 하지만 대부분의 통신 선진국의 경우 이동통신 가입자 수가 이미 포화 상태에 이른 점을 감안할 때 이 방법은 현실적이지 않다. 따라서 데이터 처리율(throughput) 향상과 음영지역 해소를 통한 coverage 확대를 위한 보다 근본적인 개선 방안이 요구되어왔다. 이를 해결하기 위해서 고급 전송 및 안테나 기술뿐만 아니라 무선망 구조에 이르기까지 다양한 분야에서 연구가 진행되었다. 이 중에서 기존의 무선망에 multi-hop 능력을 부가한 MMR (Mobile Multi-hop Relay) 기술이 가장 유력한 해결책으로 제시되고 있다. Multi-hop 무선망은 ad-hoc이나 peer-to-peer 망에서 이미 연구되어온 분야이다. 이동 통신망에서 multi-hop 기술의 적용은 다음의 여러 가지 이점들을 갖고 있다.

기존의 이동통신 시스템에서 기지국(BS) coverage는 대략 2~5km인데 비해 차세대 이동통신 시스템에서 RS(Relay Station)의 coverage는 약 200m~500m에 이를 것으로 예상된다. 따라서 RS에서 요구되는 송신 전력 크기가 기존 BS의 그것보다 상당히 줄어들게 되고 이로 인해 RS에서 사용되는 amplifier의 경제적

본 연구의 과정에서 여러 번의 자문에 응해주고 도움을 준 University of California, Riverside의 전산학과 Michalis Faloutsos 교수에게 감사를 표한다.

*연락처 : 이강원 교수, 139-743 서울시 노원구 공릉동 172 서울산업대학교 산업정보시스템공학과, Fax : 02-974-2849,

E-mail : kwlee@snut.ac.kr

2007년 02월 접수, 4회 수정 후 2008년 03월 게재확정.

인 설계가 가능하게 된다. 또한 RS가 설치되는 위치도 기지국 처럼 높을 필요가 없으므로 유지 보수 측면에서 운영비를 절감할 수 있다. RS는 backhaul 통신망과 연결되어 있지 않으며, 단지 기지국으로부터 무선으로 받은 데이터를 MS(Mobile Station)로 전달하거나 MS에서 받은 데이터를 기지국으로 전달하는 역할만 수행한다. 그래서 기지국과 backhaul 통신망 사이에 interface의 역할을 수행해야 하는 통신망 유지비용 문제는 발생하지 않는다.

한 셀에서 RS의 밀도가 일정 수준 이상이 되면 대부분의 MS는 기지국 보다는 하나 이상의 RS에게 훨씬 가까이 있게 된다. 이것은 인접한 RS에서 MS로의 propagation loss가 BS로부터 MS로의 그것보다 훨씬 작다는 것을 의미한다. 이는 MS와 RS 사이에 데이터 처리율을 향상시키고 큰 셀에서 고속의 데이터 처리를 위한 coverage 문제의 해법을 제시한다. 한편 BS나 RS들에 의한 다수의 동시 전송이 가능하므로 reuse efficiency나 spatial diversity를 통해 용량 증대를 꾀할 수 있다.

MMR을 도입함으로써 총 데이터 처리율의 측면에서 얼마정도의 용량증대를 기대할 수 있는가 하는 문제는 가장 본질적으로 규명해야 하는 문제다. 그런데 multi-hop 망의 용량 규명은 RS의 위치와 밀도, 전송전력 크기, BS와 RS에서 사용하는 가용대역, 그리고 트래픽 특성 등 많은 인자에 의해 영향을 받기 때문에 이에 대한 적절한 연구는 아직 광범위하게 이루어지지 않고 있는 실정이다. Cho(2006)는 Manhattan grid 형태의 망구조 하에서 2-hop relay 망의 용량을 한 BS당 RS의 수를 4개로 하여 살펴보았는데 downlink의 경우 대략 20%의 용량증대를 확인하였다. Zimmermann(2005)도 Manhattan grid 형태의 망구조 하에서 multi-hop 망의 용량 증대를 확인하였다. 일정 지역 내에서 교차로의 개수와 access point 개수의 비율로 expansion 상태($0 < e < 1$)를 정의 하였는데 한 BS당 동, 서, 남, 북 네 방향으로 RS를 배치함으로써 expansion 상태 값을 증가시킬 수 있다. Oyman(2006)은 선형 망구조 하에서 multi-hop 망의 데이터 처리율이 상당히 개선된다는 사실을 확인하였다. 한편 Law(2006)는 단말이 중계기 역할을 수행하는 mesh 망에서 multi-hop 무선 relay가 throughput 용량을 개선시킨다는 사실을 보여주었다. 망구조는 선형과 hexagonal 형태를 가정하였다.

본 연구의 목적은 고정형 MMR 시스템을 통해 어느 정도의 용량 증대를 획득할 수 있는지 규명하는 것이다. 위에서 살펴본 기존의 연구에서처럼 선형 혹은 grid 형태로 RS를 배치하지 않고 tier 개념을 사용하여 셀의 경계를 따라 RS를 배치하였다. 이 방법에서는 원하는 수의 tier와 또 각 tier 당 원하는 개수의 RS를 가질 수 있다. 본 연구에서는 tier의 수, 각 tier에 있는 RS의 개수 그리고 RS와 BS에 각각 할당된 무선 대역 크기를 변화시켜 나가면서 시스템 용량을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다.

서론에 이어 제 2장에서는 MMR 도입에 따른 시스템 용량 변화를 규명할 수 있는 MMR 모델을 제안하였다. 제 3장에서는 MMR 시스템 용량 예측을 위한 모델을 설정하였으며 제 4장에

서는 분석 사례를 다루었다. 마지막 제 5장에서는 결론과 추후 연구 분야를 다루었다.

2. MMR 모델

본 절에서는 MMR의 도입에 따른 시스템 용량 변화를 규명할 수 있는 MMR 모델을 제시하였다.

2.1 Relay 위치 및 개수 결정

본 연구에서는 relay 배치를 위해 tier 개념을 사용하였다. 즉, 셀의 가장 가장자리에 첫 번째 tier에 해당되는 relay를 배치하였고 그 안쪽으로 두 번째 tier에 해당되는 relay를 배치하였다. $RS_{m,i}$ 는 $m(m = 1, 2, \dots)$ 번째 tier에 있는 $i(i = 1, 2, \dots, (n_m - 1))$ 번째 RS를 나타낸다. 같은 tier에 존재하는 RS들의 coverage 크기는 모두 같다고 가정한다.

- 기지국 커버리지: 기지국의 커버리지는 한 변이 1인 셀 형태로 가정하고 기지국의 좌표는 (0, 0)으로 한다.
- 첫 번째 tier: 다음 <그림 1>처럼 기지국 셀의 한 변에 $n_1 (n_1 > 1)$ 개의 relay를 설치 한다. Relay의 커버리지는 반지름 r_1 을 갖는 원으로 r_1 과 n_1 의 관계는 다음과 같다.

$$2(n_1 - 1)r_1 + (2/\sqrt{3})r_1 = 1$$

$$r_1 = \frac{1}{2(n_1 - 1) + \frac{2}{\sqrt{3}}}$$

한편 relay의 위치는 좌표 $(x_{1,i}, y_{2,i}), i = 1, 2, \dots, (n_1 - 1)$ 로 구해질 수 있는데 이는 n_1 의 함수로 표시된다.

- 두 번째 tier: 첫 번째 tier relay의 바로 안쪽에 다음 <그림 1>처럼 $n_2 - 1$ 개의 relay를 설치한다. Relay의 커버리지는 반지름 r_2 를 갖는 원으로 r_2 는 n_1 과 n_2 의 함수로 표시된다.

$$2(n_2 - 1)r_2 + (2/\sqrt{3})r_2 = 1 - (4/\sqrt{3})r_1$$

$$r_2 = \left\{ 1 - \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2(n_1 - 1) + \frac{2}{\sqrt{3}}} \right) \right\} / \left\{ 2(n_2 - 1) + \frac{2}{\sqrt{3}} \right\}$$

이때 relay의 위치 좌표는 $(x_{2,i}, y_{2,i}), i = 1, 2, \dots, (n_2 - 1)$, 로 구해질 수 있는데 이는 n_1 과 n_2 의 함수로 표시된다.

위의 과정을 반복적으로 수행하면 원하는 tier 만큼 relay들을 배치할 수 있는데 본 연구에서는 최대 두 번째 tier까지 relay 배치를 제한하였다. 위의 절차를 거쳐 $n_1 = 4, n_2 = 3$ 의 경우 구한 relay의 좌표는 다음 <표 1>과 같다.

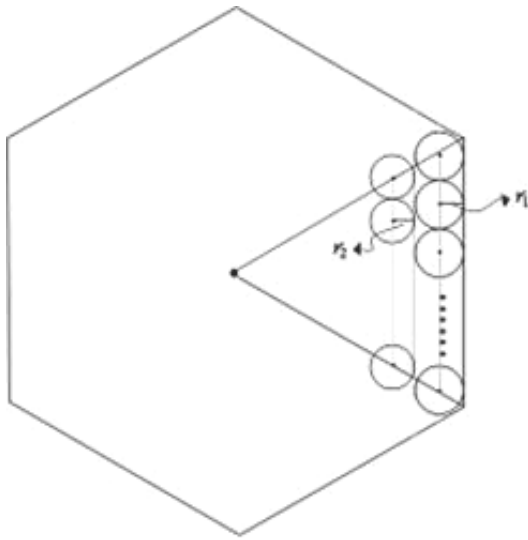


그림 1. Relay 개수 및 위치

표 1. Relay의 좌표($n_1 = 4, n_2 = 3$)

	첫 번째 tier Relay 좌표	두 번째 tier relay 좌표
1	(0.756791902, -0.218467004)	(0.54304864, -0.10450976)
2	(0.756791902, 0.218467004)	(0.54304864, 0.10450976)
⋮	⋮	⋮
12	(-0.567593926, -0.54616751)	(0.362032427, -0.418039038)
⋮	⋮	
18	(0.567593926, -0.54616751)	

2.2 채널 모델

본 연구에서는 다음 세 구간의 경로 손실을 위하여 IEEE802.16j에서 제시한 모델(2006)을 사용하였다.

- BS와 MS간 경로 손실(Type C)
- RS와 MS간 경로 손실(Type F)
- BS와 RS간 경로 손실(Type D)

2.3 무선 자원 할당과 간섭(Interference)

모든 MS는 두 개의 통신 interface, 즉 infrastructure cellular interface와 relay interface를 갖고 있다고 가정한다. 기지국의 커버리지 내에 있는 MS는 기지국과 통신하기 위하여 cellular interface를 이용하는 반면에 RS의 커버리지 내에 있는 MS는 relay interface를 이용하여 자신의 해당 RS와 통신한다. 이때 두 interface는 서로 겹치지 않는 채널을 사용하기 때문에 서로 간섭하지 않는다. 본 연구에서는 고정된 spectral bandwidth를 infrastructure 망과 relay 망 사이에 서로 공유한다고 가정했다. B를 가용한 총 대역이라고 하면 $\delta \cdot B$ ($0 < \delta < 1$)는 infrastructure 통신을 위하여 BS에 할당된 대역이고 $(1-\delta) \cdot B$ 는 relay 통신을 위하여 할당

된 대역이다. BS에 할당된 대역은 다시 MS에게 전송을 위한 대역 $\alpha \cdot \delta \cdot B$ 와 RS로 전송을 위해 필요한 대역 $(1-\alpha) \cdot \delta \cdot B$ 로 나눌 수 있다 ($0 < \alpha < 1$). 본 연구에서 BS는 셀 내에 있는 모든 RS와 직접 통신한다고 가정 하였다. 본 연구의 목적이 RS 배치를 통한 coverage 확장을 조사하는 것이 아니라 용량 증대를 규명하는 것이기 때문에 이 가정은 큰 무리가 없다.

BS와 직접 통신하는 MS는 다음 <그림 2>에서 보는 것처럼 두 번째 tier까지의 BS로부터 수신되는 co-channel의 간섭을 받는다. 위에서 언급한 것처럼 RS와는 서로 겹치지 않는 채널을 사용하기 때문에 서로 간섭하지 않는다.

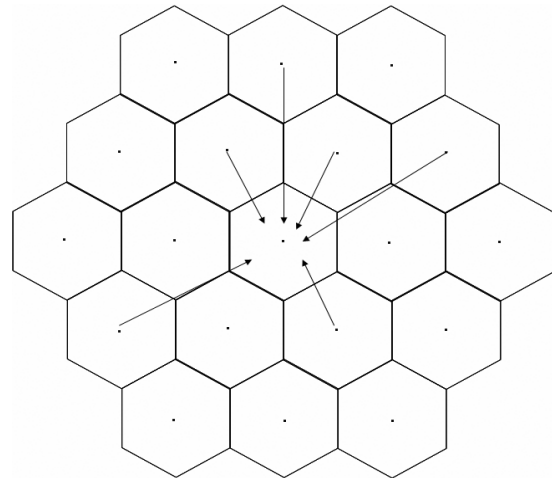


그림 2. Infrastructure 망에 있는 MS의 간섭

한편 RS에서는 서로간의 co-channel 간섭을 피하기 위하여 다음과 같은 frequency reuse 방법을 사용하였다.

- ① Relay를 첫 번째 tier에만 배치할 경우에는 frequency reuse factor를 2로 한다. 같은 번호를 갖고 또 그 coverage 내에 MS가 존재하는 RS로부터는 co-channel interference를 받는다<그림 3>. 이 경우 각 RS에는 $(1-\delta) \cdot B/2$ 의 대역이 할당된다. 한편 BS가 각 $RS_{1,i}$ 로 전송을 위하여 할당하는 대역 $BR_{1,i}$ 은 다음과 같이 정하였다.

$$BR_{1,i} = (1-\alpha) \cdot \delta \cdot B \cdot \frac{\text{relay 셀 } i \text{에 있는 MS 수}(=k_{1,i})}{\text{첫 번째 tier relay 셀들에 있는 총 MS수}(=N_1)},$$

$$i = 1, 2, \dots, 6(n_1 - 1)$$

위 식에서 $N_1 = k_{1,1} + k_{1,2} + \dots + k_{1,6(n_1-1)}$ 이다.

- ② 두 번째 tier 까지 RS를 배치 할 경우엔 다음 <그림 4>처럼 frequency reuse factor를 4로 한다. 같은 번호를 갖고 또 그 coverage 내에 MS가 존재하는 RS로부터는 co-channel interference를 받는다.

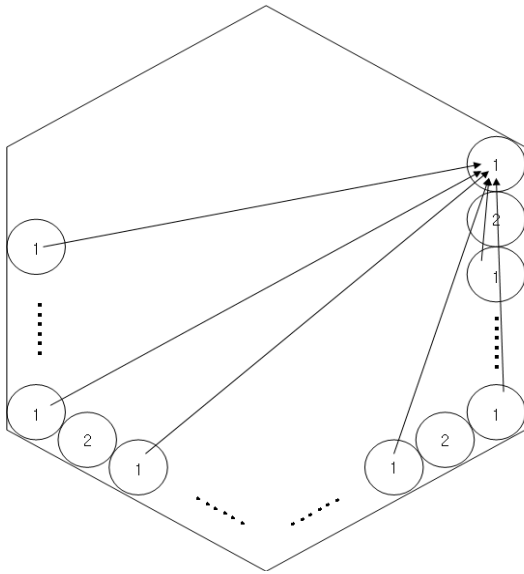


그림 3. RS coverage 내에 있는 MS의 간섭(frequency reuse factor = 2)

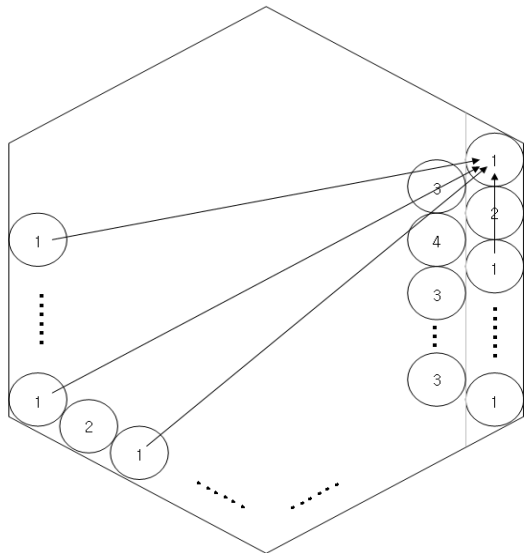


그림 4. RS coverage 내에 있는 MS의 간섭 (frequency reuse factor = 4)

각 RS의 대역은 그들의 면적 비를 토대로 할당하였다. 즉, <그림 4>의 RS 1과 3(혹은 2와 4)의 coverage 면적비가 a : b라면, RS 1(혹은 2)과 3(혹은 4)에 할당되는 대역은 다음처럼 구해진다.

$$RS\ 1\ (혹은\ 2)\ 에\ 할당되는\ 대역 = (1-\delta) \cdot B \cdot \frac{a}{a+b} \cdot \frac{1}{2}$$

$$RS\ 3\ (혹은\ 4)\ 에\ 할당되는\ 대역 = (1-\delta) \cdot B \cdot \frac{b}{a+b} \cdot \frac{1}{2}$$

한편 BS가 첫 번째 tier에 있는 $RS_{1,i}$ 로 전송을 위하여 할당

하는 대역 $BR_{1,i}$ 와 두 번째 tier에 있는 $RS_{2,j}$ 로 전송을 위하여 할당하는 대역 $BR_{2,j}$ 는 다음과 같이 구해진다. 앞에서 언급한 것처럼 본 연구에서는 BS가 첫 번째 tier와 두 번째 tier에 있는 RS 모두에게 직접 전송한다고 가정한다. 먼저 $(1-\alpha) \cdot \delta \cdot B$ 를 첫 번째 tier의 relay들에게 할당하는 비율을 $\theta(0 < \theta < 1)$, 그리고 두 번째 tier의 RS들에게 할당하는 비율을 $1 - \theta$ 라고 하자. 그러면,

$$BR_{1,i} = (1-\alpha) \cdot \delta \cdot B \cdot (1-\theta) \cdot \frac{\text{첫 번째 tier의 relay 셀 } j\ \text{에 있는 MS수}(=k_{i,j})}{\text{첫 번째 tier의 relay 셀들에 있는 MS수}(=N_1)},$$

$$i = 1, 2, \dots, 6(n_1 - 1)$$

$$BR_{2,j} = (1-\alpha) \cdot \delta \cdot B \cdot (1-\theta) \cdot \frac{\text{두 번째 tier의 relay 셀 } j\ \text{에 있는 MS수}(=k_{2,j})}{\text{두 번째 tier의 relay 셀들에 있는 MS수}(=N_2)},$$

$$j = 1, 2, \dots, 6(n_2 - 1)$$

이 때 θ 는 다음의 과정을 거쳐 정할 수 있다. α, δ, n_1 과 n_2 가 주어졌을 때 다음 <그림 6>의 relay 1과 relay 2에서의 수신 전력을 BS와 RS간의 경로 손실 모델을 통하여 구한 후 이를 바탕으로 각 RS에서 데이터율 d_1 과 d_2 를 구한다. 각 RS에게 동일한 throughput을 준다는 관점에서 relay 1에게 할당하는 비율 θ 는 다음처럼 구할 수 있다.

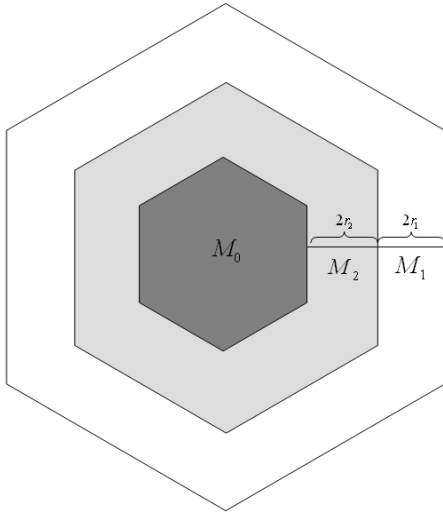
$$\theta = \frac{d_2}{d_1 + d_2}$$

그런데 α, δ, n_1 과 n_2 의 모든 조합에 대하여 θ 를 구하는 것은 경우의 수가 너무 많기 때문에 본 연구에서는 $\alpha = 0.3, \delta = 0.7$ 로 고정하고 n_1 과 n_2 의 조합에 대해서만 θ 를 구하였다.

③ 인접한 infrastructure 셀의 relay는 현재 셀의 relay와는 서로 다른 대역이 할당되어 그들 간에는 간섭이 발생하지 않는다고 가정한다.

2.4 MS 위치 및 트래픽

일정한 수 N 명의 가입자가 망에 균일하게 분포되어 있다고 가정한다. 분포의 균일성을 높이기 위하여 infrastructure 망과 relay 망에 그들의 면적 비율대로 MS 수를 각각 할당 한 후 각 망에 임의로 배치하였다. 다음 <그림 5>와 같이 M_0, M_1 , 그리고 M_2 를 각각 infrastructure 망, 첫 번째 relay 망, 두 번째 tier relay 망의 면적이라고 하자.

그림 5. M_0 , M_1 , 그리고 M_2

N_0 , N_1 , N_2 를 각각 infrastructure 망, 첫 번째 relay 망, 두 번째 tier relay 망에 할당된 가입자 수라고 하면 그들은 다음 식으로 표시된다.

$$N_0 = \frac{M_0}{M_0 + M_1 + M_2} \cdot N$$

$$N_1 = \frac{M_1}{M_0 + M_1 + M_2} \cdot N$$

$$N_2 = \frac{M_2}{M_0 + M_1 + M_2} \cdot N$$

이제 할당된 개수의 MS를 각 망에 임의로 배치한다. 이때 MS의 좌표는 (a_i, b_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ 으로 주어진다.

각 MS는 직접 서비스를 받는 BS 혹은 RS를 결정해야 하는데 이는 수신 전력이 가장 큰 BS나 혹은 RS를 선정하면 된다. 수신 전력은 BS와 RS들의 좌표를 알고 있고 또 각 MS들의 좌표도 알고 있기 때문에 앞 절에서 논의된 IEEE 802.16j의 경로 손실 모델로부터 계산될 수 있다.

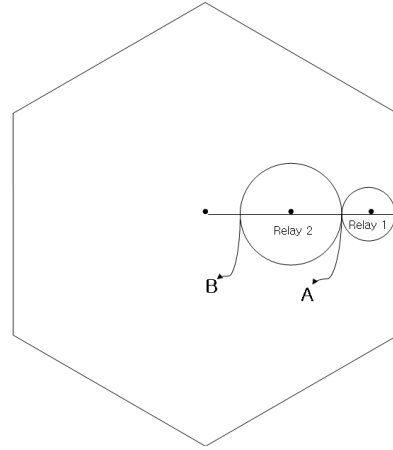
본 연구에서는 BS나 RS로부터 MS로의 전송인 downlink 트래픽만을 고려하였으며 모든 N 개의 MS는 BS나 RS로부터 항상 전송받을 데이터가 있다고 가정하였다. 이 가정은 본 연구의 목적인 MMR을 도입하였을 때 망의 용량이 기존의 cellular 망에 비해 상대적으로 얼마나 증대하는가를 규명하는 것이기 때문에 별 무리가 없다.

2.5 CINR

먼저 기지국의 송신전력 T_B 가 주어지면 각 RS의 송신 전력 T_{R_1} 과 T_{R_2} 는 다음 절차를 통해 구한다.

첫째, 다음 <그림 6>의 A점에서 BS로부터의 수신 전력과

relay 1로부터의 수신 전력을 같게 한다. 둘째, B점에서 BS로부터의 수신 전력과 relay 2로부터의 수신 전력을 같게 한다.

그림 6. T_{R_1} 과 T_{R_2}

위의 두 절차를 거치면 T_{R_1} 과 T_{R_2} 는 T_B 가 주어지면 바로 계산될 수 있다.

2.5.1 Infrastructure 망에 있는 MS의 CINR

좌표 (a_i, b_i) 를 갖는 MS_i ($i = 1, 2, \dots, N_0$) 의 CINR은 다음의 과정을 거쳐 계산될 수 있다.

가. BS로부터 수신신호 전력($BRCP_i$)

BS와 특정 단말 MS_i 까지의 거리를 바탕으로 IEEE 802.16j의 경로 손실 모델을 이용하여 계산한 후 이를 수신 신호 전력으로 바꾼다.

나. 인접한 셀로부터의 간섭($BRCI_i$)

두 번째 tier까지 인접한 BS로부터의 수신 신호 세기를 경로 손실 모델을 이용하여 각각 구한 후 이를 수신 전력으로 바꾼다. 이들의 합으로 총 간섭량을 정한다.

다. CINR 결정

$BRCP_i$ 와 $BRCI_i$ 의 비율을 구한 후 이 값을 다시 dB로 바꿔 주어 MS_i 의 $CINR_i$ 값을 구한다.

2.5.2 Relay 망에 있는 MS의 CINR

BS의 coverage 내에 존재하며 좌표 (a_i, b_i) 를 갖는 MS_i 의 $CINR_i$ 는 다음의 과정을 거쳐 계산될 수 있다.

가. RS로부터 수신신호 전력($RRCP_i$)

RS와 특정 단말 MS_i 까지의 거리를 바탕으로 IEEE 802.16j의 경로 손실 모델을 이용하여 계산한 후 이를 수신 신호 전력으로 바꾼다.

나. 인접한 RS로부터의 간섭($RRCI_i$)

같은 channel 대역을 사용하는 RS로부터 수신 신호 세기를 경로 손실 모델을 이용하여 각각 구한 후 이를 수신 전력으로 바꾼다(만약 RS의 coverage내에 MS가 존재하지 않으면 이는 고려 대상에서 제외한다). 이들의 합으로 총 간섭량을 정한다.

다. CINR 결정

$RRCP_i$ 와 $RRCI_i$ 의 비율을 구한 후 이 값을 다시 dB로 바꿔 주어 MS_i 의 $CINR_i$ 값을 구한다.

2.6 평가 척도

본 연구의 목적은 MMR 도입으로 인해 망의 용량이 얼마나 증대할 수 있는지 규명하는 것이다. 본 연구에서는 망이 최대한의 공평성을 보장해주는 경우를 고려한다. 즉 모든 단말이 같은 throughput을 갖도록 한다. 이를 위해 본 연구에서는 uniform throughput 이라는 새로운 척도를 정의한다. Uniform throughput은 망에서 각 MS들이 받는 throughput 들의 최소치로서 정의되는데 우리의 목표는 이 uniform throughput을 최대화 하는 것이다. 그런데 시스템 내의 무선 자원, 즉 BS나 RS에 할당된 무선 대역이 모든 MS들 사이에 서로 공유되기 때문에 uniform throughput은 모든 MS들이 같은 throughput을 가질 때, 즉 최대 공평성을 이룰 때, 가장 극대화 된다.

본 연구에서 시스템 용량은 망 내에 있는 모든 MS들의 uniform throughput 들의 합으로 정의한다. 그러므로 시스템의 용량을 결정하기 위해서는 먼저 infrastructure 망과 relay망의 최대 uniform throughput을 결정해야 할 것이다. 또한 망 내에 있는 모든 MS들 사이에 공평성을 달성하기 위해서는 infrastructure 망의 uniform throughput과 relay 망의 uniform throughput이 같을 필요가 있다.

3. 시스템 용량 예측 모델

앞 절의 평가 척도에서도 언급했듯이 MMR 개념이 도입된 시스템의 용량은 infrastructure 망과 relay 망의 용량을 토대로 결정 될 수 있다.

3.1 Infrastructure 망의 uniform throughput

Infrastructure 망에 할당된 대역 $\alpha \cdot \delta \cdot B$ 로 최대 uniform throughput λ_I 를 얻기 위해서 기지국은 infrastructure 망 내에 있는 모든 MS가 같은 throughput을 갖도록 해야 한다. 이를 위해서는 최대 공평성을 확보할 수 있는 최적의 기지국 전송 스케줄을 발견해야만 한다. c_i 를 MS_i 의 전송률이라 하고 u_i 를 BS가 MS_i 에게 전송하는 시간 비율이라고 하면 이 문제는 다음과 같이 모형화 될 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \lambda_I \\ & \text{Subject to } c_i \cdot u_i = \lambda_I, i = 1, 2, \dots, N_0 \\ & \sum_{i=1}^{N_0} u_i = 1 \end{aligned}$$

위 식에서 c_i 는 앞장에서 구한 CINR로부터 다음 과정을 거쳐 구할 수 있다. 각 MS들은 목표로 하는 FER(Frame Error Rate)을 달성하기 위해 최소 CINR 값에 기초하여 순간적인 CINR 값에 따라 변조 방식과 코딩 속도를 결정한다. MS로 전송을 위하여 BS에 할당된 대역은 $\alpha \cdot \delta \cdot B$ 이다. 이를 토대로 주어진 변조 방식과 코딩 속도에 따른 MS의 전송률을 구한다.

3.2 Relay 망의 uniform throughput($\lambda_{R_m}^*$, $m = 1, 2$)

Relay 망의 uniform throughput 결정을 위해서는 다음 두 가지 사항이 고려되어야 한다. 먼저 relay 셀 자체에 할당된 대역을 통하여 획득할 수 있는 최대 uniform throughput $\lambda_{R_{m,i}}$ 와 동시에 BS에서 각 relay 셀 i 로 전송을 위하여 할당할 대역으로 달성할 수 있는 최대 uniform throughput $\lambda_{BR_{m,i}}$ 를 구해야만 한다.

3.2.1 $\lambda_{R_{m,i}}$

Relay 망의 최대 uniform throughput을 얻기 위해서 RS는 relay 망 내에 있는 모든 MS가 같은 throughput을 갖도록 해야 한다. 이를 위해서는 최대 공평성을 확보할 수 있는 최적의 기지국 전송 스케줄을 발견해야만 한다. $RS_{m,i}$ 의 coverage 내에 있는 MS_j 의 전송률을 c_j 라하고 u_j 를 RS가 MS에게 전송하는 시간 비율이라고 하면 이 문제는 다음과 같이 모형화 될 수 있다. 즉, m ($m = 1, 2$) 번째 tier에 있는 i ($i = 1, 2, \dots, (n_m-1)$) 번째 relay $RS_{m,i}$ 에 대하여

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \lambda_{R_{m,i}} \\ & \text{Subject to } c_j \cdot u_j = \lambda_{R_{m,i}}, j = 1, 2, \dots, k_{m,i} \\ & \sum_{j=1}^{k_{m,i}} u_j = 1 \end{aligned}$$

위 식에서 $k_{m,i}$ 는 $RS_{m,i}$ 의 coverage 내에 있는 MS의 개수이다. 한편 c_j 는 λ_I 를 구하기 위해서 위에서 언급한 것과 같은 방법으로 구하면 된다. 다만 각 relay 망에 할당된 대역은 제 2장의 무선자원할당에서 언급한 방식을 통해 구한다.

3.2.2 $\lambda_{BR_{m,i}}$

먼저 BS에서 RS로 전송을 위하여 할당된 총 대역은 $(1-\alpha) \cdot \delta \cdot B$ 이다. 이때 제 2장의 무선자원 할당에서 언급한 절차를 통해 첫 번째 tier의 $RS_{1,i}$ 와 두 번째 tier의 $RS_{2,j}$ 에게 할당하는 대역은 각각 $BR_{1,i}$ 와 $BR_{2,j}$ 로 주어진다. 이제 BS에서

$RS_{1,i}$ 와 $RS_{2,j}$ 까지의 손실 경로 모델을 통하여 수신 신호 세기(dB)가 결정되고 또한 인접 BS와 같은 번호를 갖는 RS로부터의 간섭량을 구하면 각 RS에서의 CINR 값이 결정된다. 이 값에 따라 변조 방식과 코딩 속도가 결정되고 $BR_{1,i}$ 와 $BR_{2,j}$ 를 토대로 각 $RS_{1,i}$ 와 $RS_{2,j}$ 에서의 데이터 전송률 $rd_{1,i}$ 와 $rd_{2,j}$ 를 구할 수 있다. 그러면 $\lambda_{BR_{m,i}}$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\lambda_{BR_{1,i}} = \frac{rd_{1,i}}{k_{1,i}}, \quad i = 1, 2, \dots, 6(n_1 - 1)$$

$$\lambda_{BR_{2,j}} = \frac{rd_{2,j}}{k_{2,j}}, \quad j = 1, 2, \dots, 6(n_2 - 1)$$

그런데 위에서 구한 $\lambda_{BR_{m,i}}$ ($m = 1, 2$)는 m 이 주어졌을 때 BS에서 RS까지의 거리가 거의 비슷하고 또 각 셀에 있는 MS의 개수에 비례해서 대역을 할당해 준 후 이를 토대로 구한 전송율을 다시 그 셀에 있는 MS 개수로 나누었으므로 i 나 j 에 무관하게 거의 같은 값을 갖는다.

이제 위의 $\lambda_{R_{m,i}}$ 와 $\lambda_{BR_{m,i}}$ 를 토대로 $RS_{1,i}$ 와 $RS_{2,j}$ 의 uniform throughput은 다음 식으로 주어진다.

$$\lambda_{R_{1,i}}^* = \min \{ \lambda_{R_{1,i}}, \lambda_{BR_{1,i}} \}, \quad i = 1, 2, \dots, 6(n_1 - 1)$$

$$\lambda_{R_{2,j}}^* = \min \{ \lambda_{R_{2,j}}, \lambda_{BR_{2,j}} \}, \quad j = 1, 2, \dots, 6(n_2 - 1)$$

3.3 시스템 용량 결정

시스템의 총 용량 C_s 는 망 내에 있는 모든 단말의 throughput λ_I 와 $\lambda_{R_{1,i}}^*$ ($i = 1, 2, \dots, 6(n_1 - 1)$) 그리고 $\lambda_{R_{2,j}}^*$ ($j = 1, 2, \dots, 6(n_2 - 1)$)가 주어지면 다음 식으로 구할 수 있다.

$$C_s = N_0 \cdot \lambda_I + \sum_{i=1}^{6(n_1-1)} k_{1,i} \cdot \lambda_{R_{1,i}}^* + \sum_{j=1}^{6(n_2-1)} k_{2,i} \cdot \lambda_{R_{2,j}}^*$$

한편 MS들 간에 공평성을 유지하기 위해서는 $\lambda_I = \lambda_{R_{1,i}}^* = \lambda_{R_{2,j}}^*$ 일 필요가 있고, 이때 C_s 를 시스템의 총 용량으로 설정하였다. 본 연구에서는 infrastructure 망과 relay 망에 대역 할당 비율인 δ , BS와 RS간 통신을 위한 대역 할당 비율이 α , 그리고 relay 개수 n_1 과 n_2 값을 조정해 나가면서 $\lambda_I = \lambda_{R_{1,i}}^* = \lambda_{R_{2,j}}^*$ 가 되는 점을 찾아나갔다.

4. 사례 분석

본 장에서는 제 3장의 용량 예측 모델을 토대로 기존의 cellular

망에 MMR 도입시 얼마나 용량 증대가 가능한지 살펴보았다. 이를 위해 시스템 파라메타 값을 다음 <표 2>와 같이 가정하였다.

표 2. 시스템 파라메타 값

시스템 파라메타	값
N	500
n_1	3~6
n_2	3~6($n_1 \geq n_2$)
B	40MHz
δ	0.9~0.6
α	0.5~0.1
T_B	100dB
T_{R_1}	n_1 과 n_2 의 함수로 결정
T_{R_2}	n_1 과 n_2 의 함수로 결정

본 연구에서는 다음의 3가지 경우 각각 시스템 용량을 시뮬레이션을 통해 구했다.

- i) Relay를 사용하지 않는 경우
- ii) 첫 번째 tier에만 relay를 배치하는 경우
- iii) 첫 번째와 두 번째 tier에 relay를 배치하는 경우

각 경우의 값은 시뮬레이션을 100번 수행한 결과의 평균치이다.

4.1 시뮬레이션 결과

4.1.1 기존 cellular 망의 시스템 용량

이 경우 망의 uniform throughput은 제 3장의 infrastructure 망의 uniform throughput을 구하는 방식을 이용하여 구했다. uniform throughput은 0.076Mbps로 나왔으며 이 경우 총 시스템 용량은 $500 \times 0.076 = 38$ Mbps이다.

4.1.2 MMR 시스템

λ_I 와 $\lambda_{R_{1,i}}^*$, $\lambda_{R_{2,j}}^*$ 값들은 n_1 , n_2 그리고 δ 와 α 값에 따라 다양한 값을 갖는다. 한편 <표 2>의 파라메타 값 내에서는 다음처럼 나타났다.

$$\lambda_{R_{1,i}}^* = \min \{ \lambda_{R_{1,i}}, \lambda_{BR_{1,i}} \} = \lambda_{BR_{1,i}}, \quad i = 1, 2, \dots, 6(n_1 - 1)$$

$$\lambda_{R_{2,j}}^* = \min \{ \lambda_{R_{2,j}}, \lambda_{BR_{2,j}} \} = \lambda_{BR_{2,j}}, \quad j = 1, 2, \dots, 6(n_2 - 1)$$

그런데 이 값들은 앞에서 언급했듯이 i 와 j 에 무관하게 거의 같은 값을 가지므로 이들의 평균값, $\overline{\lambda_{R_1}^*}$ 와 $\overline{\lambda_{R_2}^*}$ 를 구하였다. 시뮬레이션 결과는 매우 방대한 관계로 4.2결과 분석에서 요약 정리 하였다.

4.2 결과 분석

MMR 도입으로 인한 시스템의 용량 증대를 살펴보기 위해 다음의 두 가지 관점에서 결과 자료를 정리하였다.

4.2.1 결과 분석 1

MMR을 설치하지 않은 기존의 cellular 망의 uniform throughput 이 0.076으로 나타났으므로 infrastructure 망과 relay망 내의 단말들의 평균 uniform throughput이 모두 0.076보다 큰 경우를 살펴보았다. 다음 <표 3>과 <표 4>에는 위의 관점에서 결과를 정리 하였다.

표 3. 첫 번째 tier에만 RS를 설치한 경우

n_1	δ	α	λ_I	$\overline{\lambda_{R_1}^*}$	C_s	용량증가(%)
3	0.9	0.3	0.105	0.085	47.2	24.2
4	0.9	0.5	0.116	0.076	49.4	30.0
		0.4	0.093	0.091	46.2	21.5
	0.8	0.4	0.083	0.081	41.1	8.1
6	0.9	0.5	0.078	0.076	39.3	3.4

표 4. 첫 번째 tier와 두 번째 tier모두에 RS를 설치한 경우

n_1	n_2	δ	α	λ_I	$\overline{\lambda_{R_1}^*}$	$\overline{\lambda_{R_2}^*}$	C_s	용량증가(%)
3	3	0.9	0.2	0.235	0.076	0.155	65.1	71.3
			0.1	0.117	0.086	0.173	57.5	51.3
		0.8	0.1	0.104	0.076	0.155	51.5	35.5
4	3	0.9	0.2	0.173	0.082	0.126	60.0	57.8
			0.1	0.087	0.093	0.142	53.4	40.5
		0.8	0.1	0.077	0.082	0.126	47.5	25.0
4	4	0.9	0.2	0.132	0.101	0.081	53.3	40.2
5	5	0.9	0.2	0.091	0.085	0.087	45.2	18.9
6	5	0.9	0.2	0.08	0.078	0.121	40.7	7.1
	6	0.9	0.3	0.104	0.076	0.081	47.5	25.0

이때 용량 증가는 최소 3.4%에서 최대 71.3% 까지 나타났다. 그런데 기존의 cellular 망의 용량 38Mbps는 모든 MS들이 같은 throughput을 갖는 조건에서 산출된 값이고 위의 <표 3>과 <표 4>의 결과는 이 조건을 만족하지 않는다. 따라서 이 두 경우의 직접적인 용량 비교는 무리가 있고 적절하지 않다. 다음 결과 분석 2에는 공평성 조건을 추가하여 결과를 다시 정리하였다.

위 결과자료는 RS를 많이 배치한다고 해서 시스템 용량이 늘어난다는 사실을 보여 주지 않는다. 오히려 그 반대 사실을 보여주고 있다. 예로($n_1 = 4, \delta = 0.9, \alpha = 0.5$)의 시스템 용량이($n_1 = 6, \delta = 0.9, \alpha = 0.5$)의 시스템 용량보다 크게 나타난다. ($n_1 = 4, n_2 = 3, \delta = 0.9, \alpha = 0.2$)와 ($n_1 = 5, n_2 = 5, \delta =$

$0.9, \alpha = 0.2$)의 경우도 마찬가지다.

본 연구 결과는 tier가 용량에 미치는 영향을 보여준다. 즉, 첫 번째 tier에 추가하여 두 번째 tier에도 RS를 배치하고 δ 와 α 를 적절히 결정함으로써 용량 증대를 이룰 수 있다는 사실을 보여준다. 예로($n_1 = 3, \delta = 0.9, \alpha = 0.5$)하에서 시스템 용량은 47.2 이다. 반면에 두 번째 tier에도 RS를 배치하고($n_1 = 3, n_2 = 3$) δ 와 α 를 각각 0.9와 0.2로 결정 하면 시스템 용량은 65.1까지 증가한다.

같은 개수의 RS를 갖고 tier 형태로 RS를 배치하는 것이 보다 많은 용량 증대를 이룰 수 있다는 사실도 보여준다. 다음 두 경우 RS의 개수는 30 개로 같다($n_1 = 4, n_2 = 3$)과($n_1 = 6$). 그런데 ($n_1 = 6$)의 경우 δ 와 α 를 각각 0.9와 0.5로 하여 시스템 용량이 39.3이지만($n_1 = 4, n_2 = 3$)의 경우에는 $\delta = 0.9$ 와 $\alpha = 0.2$ 로 하면 용량이 60에 이른다.

n_1, n_2, δ 그리고 α 사이에 상호관계가 시스템 용량에 어떻게 영향을 미치는지를 정확히 파악하는 것은 매우 어려워 보인다. 이 부분에 대한 분석은 추후 연구과제로 남긴다.

4.2.2 결과 분석 2

MS의 공평성(fairness) 관점에서 결과를 다시 살펴보았다. 즉 infrastructure 망과 relay 망 내 단말들의 평균 uniform throughput 이 모두 0.076 보다 크고 동시에 이 값들이 같은 값을 갖는 경우를 살펴보았다. <표 3>과 <표 4>에서 infrastructure 망과 relay 망들의 uniform throughput 값들이 비교적 일치하는 경우를 골라 다음 <표 5>와 <표 6>에 결과를 재정리 하였다.

표 5. 첫 번째 tier에만 relay를 설치한 경우

n_1	δ	α	λ_I	$\overline{\lambda_{R_1}^*}$	C_s	용량증가(%)
4	0.9	0.4	0.093	0.091	46.2	21.5
	0.8	0.4	0.083	0.081	41.1	8.1
6	0.9	0.5	0.075	0.078	39.3	3.4

표 6. 첫 번째 tier와 두 번째 tier모두에 relay를 설치한 경우

n_1	n_2	δ	α	λ_I	$\overline{\lambda_{R_1}^*}$	$\overline{\lambda_{R_2}^*}$	C_s	용량증가(%)
5	5	0.9	0.2	0.091	0.085	0.087	45.2	18.9

이때 용량 증가는 첫 번째 tier에만 relay를 설치 할 경우에 최대 21.5%, 첫 번째와 두 번째 tier 모두에 relay를 설치할 경우는 최대 18.9%로 나타났다.

5. 결론 및 추후 연구방향

본 연구에서는 MMR 도입에 따른 용량 증대를 분석하였다. 셀

경계를 따라 RS 를 몇 개의 tier로 배치하는 방법을 제시하였다. 이 방법을 따르면 원하는 개수의 tier와 또 각 tier당 원하는 개수의 RS 를 배치할 수 있다. Tier의 수와 각 tier당 RS 개수 그리고 BS 와 RS 에 할당되는 대역을 변화시켜 나가면서 시스템 용량을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 첫 번째 tier에만 relay를 설치할 경우에 최대 21.5%, 첫 번째와 두 번째 tier 모두에 relay를 설치할 경우는 최대 18.9%의 용량 증가를 나타냈다. 보다 정확한 용량 분석을 위해서는 다음의 사항이 보완될 필요가 있다.

첫째, 본 분석에서는 인접한 셀의 relay들은 서로 다른 대역을 사용하고 따라서 이들 간의 간섭은 없다고 가정하였다. 추후 모델에서는 이 가정을 보다 일반화하여 인접한 셀의 relay간 간섭도 고려해야 할 것이다.

둘째, 본 연구에서는 MMR을 통한 셀의 coverage 확장보다는 용량 증대에 초점을 맞추었다. 그래서 BS 의 coverage 안에 있는 첫 번째와 두 번째 tier의 relay들에게 BS 에서 직접 전송한다고 가정하였다. 보다 일반화된 모델을 위해서는 relay들 간에도 전송이 가능하도록 허용되어야 할 것이다.

셋째, 본 연구에서 안테나 gain 부분은 모델에서 제외하였는데 보다 정확한 결과 도출을 위해서는 추후 모델에 고려되어야 할 것이다.

넷째, n_1 , n_2 , δ 그리고 α 사이에 상호관계가 시스템 용량에 미치는 영향을 정확히 파악하는 것은 매우 어려워 보인다. 이

에 대한 정확한 이해는 최적 MMR 시스템 설계에 많은 도움이 될 것이다.

참고문헌

- Akyildiz, I. F. *et al.* (2005), Wireless Mesh Networks : A Survey, *Computer Networks*, 47, 445-487.
- Cho, J. (2006), Downlink and Uplink Cell Throughput Enhancement, IEEE 802.16 MMR Tutorial.
- Faloutsos, M. and Srikanth, V. K. (2007), Can Multi-hop Wireless Relay Improve the Capacity of Cellular Networks?, Technical Report, University of California, Riverside.
- IEEE 802.16j-06/013 (2006), Multihop Relay System Evaluation Methodology (Channel Model and Performance Metric).
- Law, L. K., Krishnamurthy, S. V., and Faloutsos, M. (2006), Can Multihop Wireless Relays Improve the throughput Capacity of the Cellular Network?, Computer Science Department, University of California, Riverside.
- Oyman, O., Laneman, N., and Sandhu, S. (2006), Multihop Relaying for Broadband Wireless Mesh Networks: From Theory to Practice.
- Yanikomeroglu, H. (2006), Fixed and Mobile Relaying Technology for Cellular Networks.
- Yanikomeroglu, H. (2006), Fixed and Mobile Relaying Technology for Cellular Networks.
- Zimmermann, H. M., Eberspacher, J., and Lott, M. (2005), Frequency Reuse for Cellular Multihop Networks.



이강원

서울대학교 공과대학 산업공학과
서울대학교 대학원 산업공학 석사
Kansas State Univ. U.S.A 산업공학 박사
한국 전자통신연구소 선임연구원
현재: 서울 산업대학교 산업정보시스템
공학과 교수



국광호

서울대학교 공과대학 산업공학과
서울대학교 대학원 산업공학 석사
청주대학교 산업공학과 전임강사
Georgia Institute of Technology, U.S.A 산업공학
박사
한국전자통신연구원 선임연구원
현재: 서울산업대학교 산업정보시스템
공학과 교수



최송인

광운대학교 응용전자공학과 졸업
광운대학교 전산기공학과 석사
현재: ETRI 이동통신연구본부 무선시스템
연구부 책임연구원