

# IEEE 802.16j 협력 전송 네트워크에서 최적의 중계국 수를 위한 분석 모델

정회원 Zilong Jin\*, 종신회원 조진성\*

## An Analytic Model for the Optimal Number of Relay Stations in IEEE 802.16j Cooperative Networks

Zilong Jin\* *Regular Member*, Jinsung Cho\*<sup>o</sup> *Lifelong Member*

### 요약

무선 협력 통신 기술은 유선 기간망과 연결 없이 설치 가능한 중계국(Relay Station)을 이용하여 추가적으로 기지국을 설치하지 않아도 커버리지 확장, 음영지역의 해소, 링크 전송률을 향상시킬 수 있다. 중계국은 중요한 이동 통신자원 중 하나로 등장하면서 많은 연구들이 최적의 중계국 선택 방안, 중계국 분배 알고리즘과 같은 주제에 초점을 맞추어 진행하여 왔다. 그러나 특정한 환경에 배치한 중계국 수와 획득할 수 있는 링크 전송률 이득 사이 관계를 정확히 분석하는 수학적 모델에 대한 제안은 없었다. 본 논문에서는 Voronoi tessellation에 의한 중계국 기반 클러스터 기법을 제안한다. 또한 Voronoi tessellation에 기반하여 배치한 중계국 수와 사용자가 획득할 수 있는 링크 전송률 이득 사이 관계에 대한 수학적 분석 모델을 추출한다. 본 논문에서 제안된 수학적 분석 모델의 정확성은 Erceg 경로 손실 모델에 기반한 시뮬레이션에 의해 검증되었다.

**Key Words** : Cooperative Communication, Relay Station, Voronoi Tessellation, Link Throughput Gain

### ABSTRACT

Cooperative communications are adopted as a promising solution to achieve high data rate over large areas in the future 4G wireless system and the relay station (RS) is the key concept in cooperative communications. However, most existing works in this area focus only on optimal RS selections. In addition, there are only few works consider another crucial issue: how many relay stations we need to place. Only when the number of relay stations is defined, the relay station selection can be performed well. In this paper we derive a formula which describes the impact of varying number of RS on end-to-end link throughput assuming a clustering scheme which is based on Voronoi tessellation. In addition to mathematical analysis on the feasibility of the formula, we also examine its performance through a set of simulations under the Erceg path loss model. Simulation results verify that the link throughput gain of our proposed scheme is promising.

### I. 서론

모바일 디바이스의 혁신적인 발전과 더불어 사용자

가 요구하는 서비스 내용은 다양해지며 전송 속도 및 품질에 대한 요구 또한 높아지고 있다. 기존 통신 시스템의 전송률에 대한 향상을 위하여 높은 주파수 대

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2011-(C1090-1121-0003))

\* 경희대학교 컴퓨터공학과 모바일 및 임베디드 시스템 연구실 ({jinzilong, chojs}@khu.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-04-181, 접수일자 : 2011년 4월 12일, 최종논문접수일자 : 2011년 6월 30일

역의 개발도 요구된다. 기존 2-3세대 이동 통신시스템의 경우 800MHz 부터 2GHz 대역에서 운용 되었지만 4세대 이동통신 시스템에서의 주파수 대역은 3GHz 이상의 주파수 대역이 할당될 추세이다. 그러나 더욱 높은 주파수 대역의 사용으로 전파의 회절 성질이 약화되므로 전파과정에서 장애물의 영향을 많이 받게 된다. 4세대 이동통신 기술의 발전에 있어서 기지국(Base Station)은 보다 더 제한된 지역에 서비스를 제공하게 되고 셀 커버리지 내 음영지역 또한 많이 발생하게 되는 문제들을 직면하게 된다.

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 기술은 이러한 차세대 통신에서 신호의 페이딩을 완화시키고 신뢰성 있는 무선 채널의 제공을 위하여 제안 되었다. MIMO 시스템에서 기존 모바일 디바이스는 여러 개의 안테나를 동시에 사용하게 되며 안테나들은 서로 협조하여 통신한다. 이로써 기존 송신자와 수신자 사이 단일 채널은 여러 안테나 사이 통신을 이루는 복수의 채널로 대체하게 된다. 한 개 채널대신 여러 개 안테나 사이에 이루어진 다이버시티 이득을 얻게 되어 신호 페이딩을 완화시키므로 무선통신 시스템의 성능을 향상시킨다.

무선 협력 통신은 안테나의 추가 장착 없이도 MIMO와 같이 공간 다이버시티 이득을 얻게 되고 차세대 이동 통신 시스템의 기지국 증설 비용을 줄임과 동시에 커버리지 확장, 음영지역 해소 및 데이터 전송률 향상을 위하여 도입된 새로운 기술이다. 무선 협력 통신에서는 중계국이라는 단말을 도입하여 기존 송신자와 수신자 사이에서 가장안테나와 같이 작동되며 공간 다이버시티 이득을 얻게 된다. 중계국은 송신자가 브로드캐스트한 시그널을 수신하여 복조 및 재 변조를 거쳐 수신자에게 중계한다.

중계국은 이동성에 따라 고정형, 유목형, 이동형 중계국으로 분류할 수 있다<sup>11</sup>. 고정형 중계국은 인프라스트럭처 아키텍처를 구축하는 기본 중계국 모델이며 기간망과의 유선 연결 없이 빌딩옥상이나 도로주변의 가로등에 장착 가능하여 장착 및 보수비용을 많이 줄일 수 있다. 유목형 중계국은 자연재해로 인한 통신망 파괴나 정해진 지점에서 사용자의 폭증 등 현상으로 사용자가 한시적으로 정상적인 서비스를 받지 못하는 경우에 사용되며 신속한 배치가 가능하다. 이동형 중계국은 버스, 기차 등 사용자가 단체로 이동하는 장소에 배치하며 사용자를 대표하여 핸드오프를 수행하게 되어 자원소모를 줄이는 장점이 있다. 유목형과 이동형 중계국의 이동성 때문에 토폴로지와 분포 위치를 예측하기 어려우므로 본 논문에서는 고정형 중계국을

가지고 (뒤에서 언급한 중계국은 고정형 중계국을 의미함) 최적의 중계국 배치 문제를 분석하게 된다. 그림 1에서는 고정형 중계국을 활용하는 몇 가지 시나리오를 보여준다. 중계국은 기간망과의 유선 연결 없이 인프라스트럭처로 원활한 설치가 가능하며 지국의 커버리지 확장, 음영 및 커버리지 홀, 커버리지 예지와 같은 지역의 전송률을 향상시킨다.

앞서 소개한 것과 같이 중계국은 차세대 이동 통신의 중요한 무선자원으로 등장하면서 효율적인 중계국 사용 주제에 초점을 둔 많은 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 cost-effective 중계국 기반 인프라스트럭처 아키텍처의 구축을 위하여 일정한 환경에 최적 수의 중계국 배치 문제에 대한 연구는 제한되어 있다. 소수의 연구들은 중계국의 최적 배치 위치에 대하여 수학적 분석을 하였지만 한 개 셀룰러 환경에 배치한 중계국 수의 변화가 링크 전송률의 변화에 주는 영향을 단지 시뮬레이션으로만 보여주었다. 본 논문에서는 Voronoi tessellation기반 중계국 중심 클러스터 기법을 소개하며 이를 토대로 분포한 중계국 수와 링크 전송률 이득 사이 관계에 대하여 수학적 분석 모델을 유도한다. 본 논문에서 제안한 수학적 분석 모델은 더욱 정확한 cost-effective 중계국 기반 인프라스트럭처 아키텍처의 구축에 가이드 역할을 할 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 관련된 구로서 제안된 중계국 배치방안을 소개하고, 3절에서 수학적 분석 모델을 제시한다. 4절에서 제안된 수학적 분석 모델과 최적 수의 중계국 분포를 통해 링크 전송률 향상 사이 관계를 시뮬레이션을 통하여 분석하고, 5절에서 결론을 맺는다.

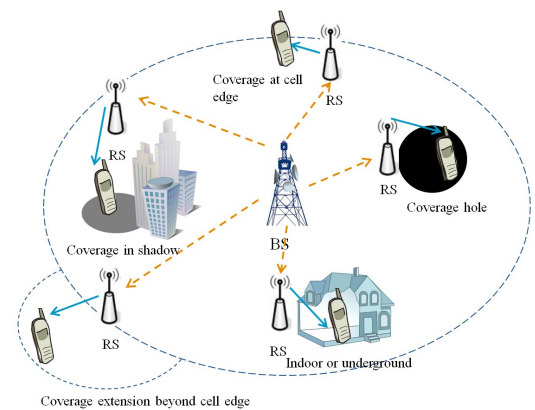


그림 1. 셀룰러 네트워크 환경에서 중계국 사용 시나리오  
Fig. 1. Examples of usage scenarios for RS

## II. 관련 연구

2006년 3월 설립한 IEEE 802.16j MMR (Mobile Multihop Relay) 네트워크 태스크 그룹은 IEEE 802.16e 시스템을 기반으로 저비용의 중계기 인프라 스트럭처 아키텍처의 구축을 추진하였으며 중계국을 차세대 이동 통신기술에서 중요한 무선자원의 하나로써 커버리지 확장, 음영지역의 해소, 링크 전송률 향상 등과 같은 다양한 시나리오에서의 활용을 제시하였다.

무선 협력통신 기술의 제안 및 중계국의 등장과 더불어 차세대 이동 통신 시스템에서 중요한 무선자원 역할을 하고 있는 중계국의 효율적인 이용을 위하여 많은 연구들이 진행되었다. [2-4]에서 송신자와 수신자의 통신과정에서 최적의 중계국을 선택하는 방안 및 그 성능에 대하여 연구하였다. [2]에서 제안된 중앙 집중 제어 방안은 전체 시스템의 정보를 BS가 통합하여 관리하며 BS와 연결 가능한 중계국의 채널 SNR 및 전송 지연을 가지고 가중치를 계산하여 각각 부여한다. 송신자는 BS로부터 중계국에 대한 정보를 획득하게 되며 중계국의 가중치의 크기에 따라 최적의 중계국을 선택하게 된다. 채널의 SNR을 고려함과 동시에 중계국의 큐 사용 상태까지 고려하여 사용자의 QoS를 최대로 보장한 방안도 [3]에서 제안되었다. 그러나 [2]와 [3]에서 제안한 방안은 링크 전송률 향상과 단일 사용자 QoS를 최대한으로 만족시켰지만, 여러 사용자가 동시에 가중치가 가장 높은 중계국을 선택함으로써 병목현상의 발생이 불가피하게 된다. [4]에서 저자는 중계국과 연결된 링크 상태뿐만 아니라 중계국의 주변 토폴로지를 동시에 고려하여 중계국을 선택하는 방안을 제안하여 병목현상의 발생을 완화시켰다. 위에서 살펴본 연구들에서 무선협력 통신의 성능향상을 목적으로 하여 중계국을 효율적으로 사용하는 방안들을 제안하였지만, 중계국에 대한 자원 관리의 전제 조건인 실제 무선 네트워크 환경에 중계국을 배치할 위치 및 최적의 배치 개수 등 중요한 문제에 대하여 언급하지 않았다.

지금까지 최적의 중계국 배치 문제에 초점을 두어 진행된 연구는 많지 않았다. [6-8]에서는 셀룰러 네트워크의 성능을 최대화 할 수 있는 최적의 중계국 배치 위치에 대하여 분석하였다. [6]에서 저자는 BS-중계국 사이 거리의 변화가 시스템 성능에 주는 영향을 시뮬레이션을 통하여 분석하였고 [7]에서는 비선형 최적화 수식에 대한 추출을 통하여 링크 전송률과 중계국의 분포 위치 사이 관계를 분석하였다. 또한 [8]에서는

nearest-neighbor 중계국 선택 기법을 사용하여 최적의 중계국 선택을 위한 오버헤드를 최소화 하는 동시에 셀룰러 네트워크 환경에서 중계채널의 중단 확률을 최소화 할 수 있는 중계국 위치 계산에 초점을 두었다.

본 논문에서는 배치한 중계국 수와 사용자가 획득할 수 있는 링크 전송률 이득 사이 관계에 대한 수학적 분석 모델을 유도하기 위하여 Voronoi tessellation<sup>[5]</sup>을 이용하여 분석과정을 전개한다. 일반적으로 멀티홉 중계 네트워크에서 셀 외곽지역이나 음영지역에 중계국을 분포하여 이런 지역에 위치한 사용자와 중계국 사이 링크 전송률을 보다 향상시키는 것을 목표로 한다. 본 논문에서는 앞서 기술한 상황 외 셀룰러 네트워크에서 임의의 위치에 있는 사용자가 BS와의 직접통신보다 링크 전송률 향상을 가져올 수 있는 중계국의 중계를 거친 중계링크를 선택하는 상황도 고려하게 된다.

본 논문에서 [8]에서 제안한 간단한 메커니즘으로 낮은 오버헤드와 기타 최적의 중계국 선택방안에 비교하여 손색이 없는 성능을 보이는 nearest-neighbor 중계국 선택방안을 사용한다. 사용자는 신호에 포함되어 있는 거리 정보에 따라 가장 가까운 중계국과 클러스터를 형성하게 된다. 이로써 전반 셀룰러 네트워크는 중계국을 중심에 두고 그와 가까운 사용자들로 구성된 여러 클러스터로 분할하게 된다. 우리는 각각 클러스터 내 사용자와 클러스터 중심에 위치한 중계국 사이 거리를 이용하여 셀룰러 네트워크에 배치한 중계국의 수와 클러스터 내에서 사용자의 링크 전송률 사이의 관계를 분석하는 수학적 모델을 제안한다. 제안한 방안에 대한 상세내용은 3절에서 기술하도록 한다.

## III. 제안하는 방안

본 논문에서 사용자는 nearest-neighbor 중계국 선택 메커니즘을 사용하여 주변에 위치한 가장 가까운 중계국을 선택 사용하게 되며 전체 셀룰러 네트워크는 Voronoi tessellation에 의하여 여러 개의 중계국이 중심에 위치하는 클러스터로 분할된다. Voronoi tessellation<sup>[5]</sup>에는 사용자와 중계국의 집합을 요소로 하는 두 개의 포아송 포인트 프로세서  $\Pi_0$ 와  $\Pi_1$ 이 정의되어 있다. 집합  $\Pi_1$ 에 포함될 각 중계국은  $\Pi_0$ 에서 자신과 가까운 위치에 있는 사용자들과 클러스터를 이룬다. 이로써 전체 셀룰러 네트워크는 여러 개의 클러스터로 분할될 것이며 각각 클러스터마다 중계국을 중심에 두고 주변에 가까이 분포되어 있는 사용자로

구성된다. 클러스터 내 사용자는 중계국과의 최소 링크 길이를 보장받음과 동시에 낮은 경로 손실과 높은 링크 SNR(Signal to Noise Ratio)을 제공받게 된다. 본 논문에서 제안한 방안은 Voronoi tessellation에 기반 하여 셀룰러 네트워크 환경에 배치한 중계국 수와 사용자가 획득하게 될 링크 전송률 이득 사이 관계에 대하여 수학적인 모델을 유도한다.

유도과정을 전개하기 전 아래와 같은 4가지 가정을 한다.

사용자는 밀도  $\rho_0$ 에 의하여 BS가 제공해주는 커버리지 안에서 균일하게 포아송 포인트 프로세서에 따라 분포된다.

중계국은 밀도  $\rho_1$ 에 따라 사용자와 같이 분포되며  $\rho_1 = m/A$ 로 정의된다. 여기서  $A$ 와  $m$ 은 각각 셀룰러 네트워크의 면적과 분포된 중계국의 수를 나타낸다.

중계국에서의 패킷 처리 시간은 고려하지 않는다.

중계국은 time-division 방식으로 두 타임 슬롯으로 작동한다. 처음 타임 슬롯에서 중계국은 BS가 사용자에게 브로드캐스트한 시그널을 저장한다. BS의 브로드캐스트가 끝나면 두 번째 타임 슬롯을 이용하여 저장했던 시그널을 사용자에게 전송한다.

Voronoi tessellation<sup>[5]</sup>에서는 우선 아래 식 (1)과 같은 특정함수  $f(x_i)$ 의 시그마 합,  $S_f$ ,에 대한 정의로부터 분석이 시작된다.

$$S_f = \sum_{x_i} f(x_i) 1 \{x_i \in \Pi_0\} \quad (1)$$

식 (1)에서  $f(x_i)$ 의 기대치,  $E(S_f)$ ,를 아래 식 (2)로 구할 수 있다. 식 (2)에서  $f(x)$ 를 각각  $f(x) \equiv 1$ ,  $f(x) \equiv l$ 라고 정의한다면 ( $l$ 는 클러스터 내 사용자와 중계국의 링크길이를 의미) 클러스터 내 사용자수의 기대치,  $E(N)$ ,과 사용자와 중계국사이 총 링크길이의 기대치,  $E(L)$ ,를 아래 식 (3), 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$E(S_f) = \rho_0 \int f(x) e^{-\rho_1 \pi |x|^2} \quad (2)$$

$$E(N) = \frac{\rho_0}{\rho_1} \quad (3)$$

$$E(L) = \frac{\rho_0}{2\rho_1^{3/2}} \quad (4)$$

본 논문에서는 위에서 Voronoi tessellation 분석을 통하여 얻은 식 (3)과 (4)를 이용하여 클러스터의 중심에 위치한 중계국으로부터 사용자와의 평균 링크길이 이 즉 클러스터의 평균 반경을 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$E(R) = \frac{E(L)}{E(N)} = \frac{1}{2\sqrt{\rho_1}} \quad (5)$$

그 다음 기존 정의했던  $\rho_1 = m/A$ 을 식 (5)에 대입하면 식 (6)을 얻게 된다. 식 (6)에서 보여준 것과 같이 Voronoi tessellation에 기반하여 만들어진 중계국 중심 클러스터의 평균 반경,  $E(R)$ ,은 셀룰러 네트워크 환경에 분포한 중계국의 수인  $m$ 을 변수로 하는 함수이다.

$$E(R) = \sqrt{\frac{A}{4m}} \quad (6)$$

무선 협력통신에서 중계국의 중계를 거쳐 전송된 two-hop end-to-end 전송률( $C_{e2e}$ )은 식 (7)과 같이 계산된다<sup>[10]</sup>.

$$C_{e2e} = \left(\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_1}\right)^{-1} = \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1} \quad (7)$$

본 논문에서 전송률과 전송범위 사이 관계를  $C = \alpha D^\beta$ 와 같은 멱 함수형식으로 표현한다<sup>[9]</sup>.  $C$ 는 링크 전송률을 의미하며  $D$ 는 중계국과 사용자 사이 링크 거리를 의미한다. 이로써 one-hop 전송률은  $C_0 = \alpha_0 D_0^{\beta_0}$ ,  $C_1 = \alpha_1 D_1^{\beta_1}$ 와 같이 표현하게 된다. 여기서  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $D_0$  및  $D_1$ 은 각각 BS 부터 중계국, 중계국부터 사용자 사이 링크 전송률과 링크 거리를 의미 하며 실제 셀룰러 네트워크 환경에서 전송 파워, 안테나 이득, 안테나 높이, 주파수 신호 잡음 등과 관련된 환경 상수  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_0$  및  $\beta_1$ 들을 확정할 수 있다. 우리는  $C_0 = \alpha_0 D_0^{\beta_0}$ ,  $C_1 = \alpha_1 D_1^{\beta_1}$ 을 식 (7)에 대입하여 중계국의 중계를 거친 two-hop 전송률을 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{e2e} = \frac{\alpha_0 D_0^{\beta_0} \alpha_1 D_1^{\beta_1}}{\alpha_0 D_0^{\beta_0} + \alpha_1 D_1^{\beta_1}} \quad (8)$$

식 (7)을 통하여 우리는 two-hop 중계 전송률을 거리  $D_0$ 와  $D_1$ 을 변수로 하는 함수로 표현하였다. 식 (7)에서 중계국과 사용자 사이 거리  $D_1$  자리에 식 (5)에서 함수  $E(R)$  표현하는 클러스터의 평균반경을 대입하면 식 (9)을 얻게 된다.

$$C_{e2e} = \frac{\alpha_0 D_0^{\beta_0} * \alpha_1 \left(\sqrt{\frac{A}{4m}}\right)^{\beta_1}}{\alpha_0 D_0^{\beta_0} + \alpha_1 \left(\sqrt{\frac{A}{4m}}\right)^{\beta_1}} \quad (9)$$

위와 같이 일련의 분석을 통하여 얻은 식 (9)는 end-to-end 전송률에 대한 BS-중계국 사이 거리  $D_0$ 와 배치한 중계국의 수인  $m$ 에 관련된 함수라는 것을 쉽게 알 수 있다. 식 (9)를 이용하여 셀룰러 네트워크 환경에 배치한 중계국 수와 two-hop 중계 전송률을 정확히 분석 할 수 있으며 차세대 이동통신 시스템에서 cost-effective 중계국 기반 인프라스트럭처 아키텍처의 구축에 가이드 역할을 할 것이다. 시뮬레이션에서 우리는 클러스터 내 중계국과 사용자 사이의 경로손실에 대한 분석으로 식 (6)에 기반 하여 배치할 최적의 중계국 수를 확정하게 되며 식 (9)을 통하여 얻은 분석결과를 시뮬레이션의 결과와 서로 비교한다.

#### IV. 시뮬레이션

본 논문에서 진행한 시뮬레이션 환경은 아래와 같다. 기지국은 3.5 GHz 주파수에서 작동하며 10 Mhz의 채널 대역폭을 사용하여 반경 3.2 km의 커버리지를 제공해 준다. 시뮬레이션에서 Shadow fading, Multi-path fading을 고려하지 않으며 시뮬레이션 환경 파라미터에 대한 정의는 표 1에 나와 있다.

본 논문의 시뮬레이션에서 Erceg<sup>[11]</sup> 경로 손실 모델을 사용한다. Erceg 경로 손실 모델은 802.16j 태스크 그룹에서 실제 무선 네트워크 구축함에 있어서의 경로 손실 분석 모델로 참조 되었으며 송신자와 수신자의 안테나 위치에 따라 Type (A, B, C)와 Type D로 나눌 수 있다. Type (A, B, C)는 ART (Above Roof Top)-to-BRT (Below Roof Top) 환경에 적용되며 Type D는 ART-to-ART 환경에 적용된다. 본 논문에서 중계국이 각 경로손실 모델에서의 안테나 위치를 모두 ART로 맞추기 위하여 기지국과 중계국 사이의 경로 손실 모델은 Type D를 사용하며 Type C를 기지국과 사용자, 중계국과 사용자사이 경로손실 모델로 사용한다. 본 논문에서 Type C, D 경로손실 모델

표 1. Erceg 경로 손실 모델에서의 각 파라미터 값  
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Frequency ( $f$ )	3500 Mhz
Channel bandwidth	10 Mhz
Transmit power	BS, RS: 43 dBm
Antenna gain	Transmit (BS: 15 dBi, RS: 15 dBi), receive(RS: 0 dBi, User: -1 dBi)
Fade Margin	19.56 dB
Maximum Allowable Path Loss (16QAM 1/2)	128.2 dB
hbs	80 m
hrs	10 m
huser	1.7 m
Type C ( $a'$ , $b'$ , $c'$ )	3.6, 0.005, 20
Type D ( $a''$ , $b''$ , $c''$ )	3.6, 0.005, 20

하에서 시뮬레이션을 진행하게 되며 경로손실(PL)은 아래 식으로 주어진다<sup>[12]</sup>.

$$PL = \Gamma + 10 * \gamma * \log_{10}(d/d_0) + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (10)$$

식 (10)에서  $\Gamma = 20 * \log_{10}(4\pi d_0/\lambda)$ 이고,  $\lambda$ 는 미터를 단위로 한다.  $\gamma$ 는 경로손실 먹지수이며 수식  $\gamma = (a - b * h_t + c/h_t)$ 에 의하여 구할 수 있다.  $h_t$ 는 BS 혹은 중계국과 같은 송신자의 안테나 높이를 의미하게 되며  $h_{bs}$ ,  $h_{rs}$ 로 표현할 수 있다.  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 경로 손실 유형에 따라 결정되는 파라미터들이며 그 값은 표 1에 나와 있다.  $d$ 는 송신자와 수신자 사이 거리를 의미하며  $d_0 = 100$  m이다. Type C, D에서  $\Delta PL_f$ ,  $\Delta PL_h$ 는 각각  $\Delta PL_f = 6 * \log_{10}(f/2000)$ ,  $\Delta PL_h = -10.8 * \log_{10}(h_r/2)$ 에 의해 계산되며  $f$ 와  $h_r$ 은 반송파의 주파수, 중계국 ( $h_{rs}$ )과 사용자( $h_{user}$ )의 안테나 높이를 의미한다.

표 2에서는 시뮬레이션에서 사용하는 전송 모드, 전송률과 최대 전송거리 사이 관계를 표현한다. 표 2에서 보여준 것과 같이 본 논문에서 제안한 셀룰러 네트워크 환경에서 사용자와 BS가 직접 통신할 때의 최대 전송률은 11.64 Mbps이다. 이때 사용자가 중계국의 중계를 거쳐 BS의 신호를 받는다면 식 (7)에 의하여 획득할 수 있는 최대 two-hop 전송률은 5.82(11.64/2) Mbps라는 것을 알 수 있다. 이로써 표 2를 참조하여 기지국부터 반경 1.7 km 이내 위치한

표 2. 전송모드와 전송속도 및 전송 거리 사이 관계<sup>[7]</sup>  
 Table 2. The relationship between transmission mode and distance in Erceg path loss model

Modulation mode	Rate (Mbps)	Transmit range (km)
BPSK 1/2	1.27	3.2
QPSK 1/2	2.88	2.7
QPSK 3/4	3.82	2.5
16-QAM 1/2	5.76	1.9
16-QAM 3/4	7.62	1.7
64-QAM 2/3	10.36	1.3
64-QAM 3/4	11.64	1.2

사용자는 직접통신 링크 전송률이 최대 two-hop 링크 전송률보다 크므로 기지국과 직접통신하게 된다. (즉 본 논문의 시뮬레이션에서 사용하는 협력 전송 방법은 사용자와 BS사이 직접통신 전송률이 7.62Mbps (16-QAM 3/4)보다 작을 때에만 사용자는 클러스터 중심에 위치한 중계국의 협력을 요청한다). 사용자의 협력요청 받은 중계국은 two-time slot으로 기지국이 사용자한테 브로드캐스트한 데이터를 버퍼에 저장하였다 사용자한테 포워딩하는 협력전송 방법을 사용한다. 그림 2에서 중계국(RS)의 협력을 요청하게 되는 사용자의 위치 범위를 나타냈으며 그 범위는 BS로부터 반경 1.7 km-3.2 km사이의 도넛 모양을 가진다.

본 논문의 시뮬레이션에서 매번 배치한 중계국의 수의 증가에 따라 10000개의 사용자를 발생시키게 되며 95%의 신뢰구간을 (Confidence interval)을 만족시키기 위하여 시뮬레이션을 100번 수행하였다.

식 (8)에 의하여 얻은 분석결과와 시뮬레이션 결과를 그림 3에서 비교하였다. 여기서 식 (9)에 입력된 환경상수는  $\alpha_0 = 7.638$ ,  $\beta_0 = -0.665$ ,  $\alpha_1 = 16.01$ ,  $\beta_1 = -1.706$ 이다<sup>[7]</sup>. 시뮬레이션에서 중계국은 그림 2

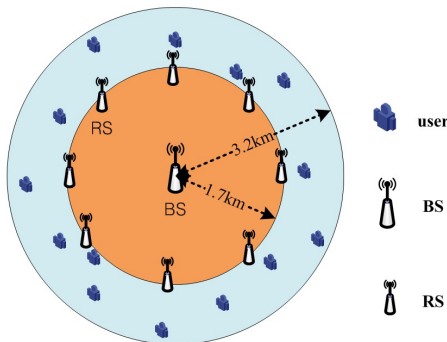


그림 2. 시뮬레이션 환경  
 Fig. 2. Simulation environment

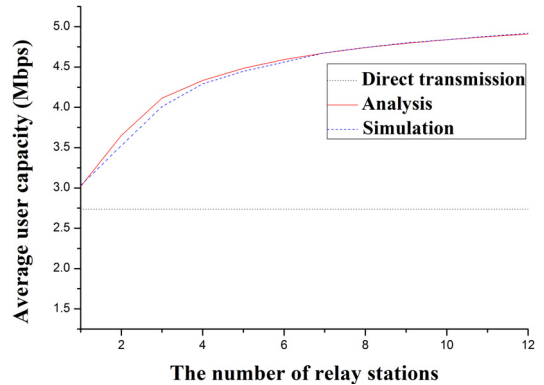


그림 3. 수학적 분석모델 및 시뮬레이션 결과 비교  
 Fig. 3. Numerical analysis and simulation results

의 도넛영역에 랜덤 분포되고 주변 사용자는 nearest-neighbor 중계국 선택 기법에 따라 가장 가까운 중계국과 클러스터를 만들게 된다. 앞서 기술한 것과 같이 도넛영역에 위치한 사용자들은 기지국이 보낸 데이터를 중계국의 협력으로 인하여 협력통신 이득을 얻게 된다. 시뮬레이션에서 각 사용자가 클러스터 내 중계국의 중계를 통한 two-hop 링크 전송률을 기록하였으며 그 결과를 그림 3에서 보여주었다. 동시에 그림 3에서 도넛 영역 내에서 배치한 중계국 수의 증가에 따른 평균 사용자와 기지국사이 two-hop 링크 전송률을 (수학적 분석모델 분석결과에서 도넛 영역의 넓이,  $x$ , 라면 실제로 도넛영역에 분포한 중계국 수

$$m' \text{는 } m' = \frac{m}{A} * \int_{1.7}^{3.2} 2\pi x dx \text{와 같이 구할 수 있다.}$$

기록하였다. 그림 3에서 수학적 분석과 시뮬레이션 결과가 배치한 중계국 수 1~4 사이에 일정한 편차를 가지고 4~12사이에서 근사 접근하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 시뮬레이션에서 적은 수의 중계국 배치 상황(1~4개 배치)에서 중계국이 셀 외곽지역에 분포로 평균 채널 카파시티 계산 결과에 영향을 많이 주게 되며 중계국 수의 증가에 따라 그 영향이 줄어들어 시뮬레이션 결과와 거의 동일하게 된다. 위의 그림에서 두 그래프에 대한 비교를 통해 본 논문에서 제안한 수학적 분석 모델을 사용하여 얻은 결과와 실제 시뮬레이션으로 얻은 결과가 근사 접근 하는 것을 볼 수 있으며 본 논문에서 제안한 수학적 분석 모델은 배치한 중계국 수와 end-to-end 전송률 사이 관계를 정확히 표현한다는 것을 검증하였다.

그림 4에서 셀룰러 네트워크 환경에 배치한 중계국 수의 증가에 따라 클러스터 내부에서 중계국-사용자 사이 경로손실의 변화를 보여주었다. 그림에서 배치한



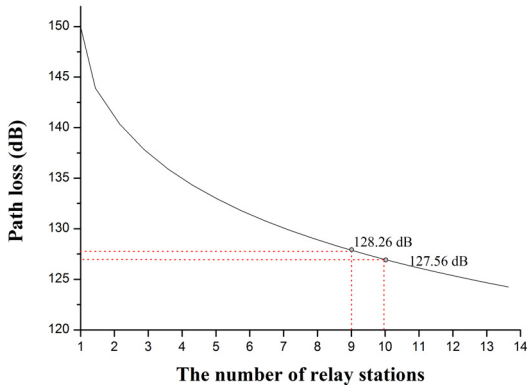


그림 4. 중계국 수에 따른 경로손실의 변화  
Fig. 4. Path loss analysis

중계국 수의 증가와 함께 클러스터내의 사용자들은 더 가까운 중계국의 협력을 받을 수 있게 되고 전파가 중계국으로부터 사용자까지 전파과정에서의 손실은 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다. [13]에서 셀룰러 네트워크 환경에서 중계국이 채널 상태 정보에 포함되어 있는 SNR 정보에 따라 QPSK 1/2, 16QAM 1/2 모듈레이션 기법을 사용했을 때 DL(Down Link) 링크 예산(link budget)을 분석하였다. 중계국을 배치할 때 클러스터 내 사용자의 수신 민감도(receiver sensitivity)를 최소 보장하기 위하여 필요한 MAPL<sup>[13]</sup> (Maximum Allowable Path Loss)는 각각 133.7 dB, 128.2 dB이다. 중계국을 분포하는 네트워크 관리자 입장에서 클러스터 내 최소 5.76 Mbps (16QAM 1/2) 링크 전송률의 보장을 본 논문의 중계국 배치의 목표로 가정 한다면 그림 4에서의 중계국 수와 경로손실의 변화로 부터 최소 10개의 중계국을 배치하여야 MAPL (128.2dB)을 만족시킬 수 있다는 것을 알게 된다.

그림 5에서 셀룰러 환경에 10개의 중계국을 배치하고 중계국의 협력으로 사용자들은 직접 통신을 통하여 얻을 수 있는 평균 2.737 Mbps 전송률보다 79%의 성능 향상을 가져 온 것을 보여준다.

그림 6에서 우리는 two-hop중계 통신과 직접 통신 사이 전송률을 비교하였다. 사용자와 BS 사이 거리가 1.7 km보다 작을 때 사용자는 협력 통신의 이득을 얻지 못한다. 그 이유는 채널상태가 충분히 좋은 상황에서 사용자와 BS가 직접 통신할 때의 최대 전송률은 11.64 Mbps(표 2)이다. 이때 사용자가 중계국의 중계를 거쳐 BS의 신호를 받는다면 3절에서의 식 (7)에 의하여 획득할 수 있는 최대 two-hop 전송률은 5.82(11.64/2) Mbps이라는 것을 쉽게 알 수 있다. 때

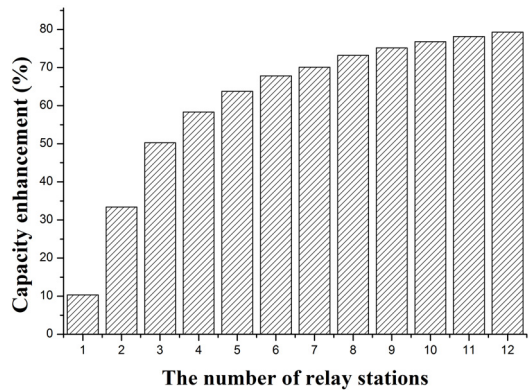


그림 5. End-to-end 링크 전송률 향상  
Fig. 5. End-to-end link throughput enhancement

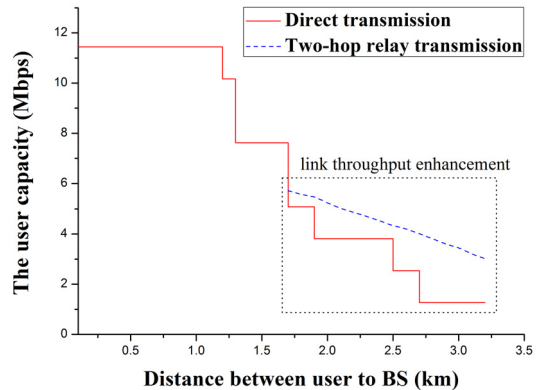


그림 6. 직접통신과 two-hop중계 전송률의 비교  
Fig. 6. Comparisons between the direct transmit capacity and two relay transmit capacity

문에 BS와 가까운 위치에 있는 사용자는 직접통신으로 높은 데이터 전송 속도를 보장 받게 되며 중계국의 협력으로 인한 two-hop 전송방식은 오히려 전송속도를 줄이게 된다. 그림 6으로부터 우리는 셀룰러 네트워크 내 반경 1.7km부터 3.2km 사이에 위치한 사용자는 협력 통신의 이득으로 BS와의 직접통신보다 높은 링크 전송률을 얻게 되는 것을 볼 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 변화하는 중계국 수와 획득할 수 있는 링크 전송률 관계를 분석하는 수학적 모델에 대한 분석에 초점을 두었다. Nearest-neighbor 중계국 선택 기법과 Voronoi tessellation을 기반으로 일련의 분석을 거쳐 배치한 중계국의 수인  $m$ 을 변수로 하는 end-to-end 전송률 함수를 얻었다. 시뮬레이션의 결과와 수학적 모델을 통하여 얻은 분석결과를 서로 비교

하여 유도해낸 수학적 모델의 정확성을 검증하였다. 그리고 클러스터 내 경로손실과 배치한 중계국 수 사이 관계에 대한 분석을 통하여 시뮬레이션 환경에 배치할 중계국의 최적의 수를 유도하였고 최적 수의 중계국을 배치했을 때 사용자의 링크 전송률 향상을 시뮬레이션으로 보여 주었다. 앞으로의 연구에서 식 (9)의 convex 성질 분석과 제한한 분석모델의 적용 범위를 two hop 중계 네트워크로부터 멀티홉 네트워크로 확장하며 센서네트워크 환경에서 분석모델의 정확성 검증 등이 계속적으로 연구되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

[1] D. Soldani, S. Dixit, and M. Bowman, "Wireless relays for broadband access", *IEEE Communications Magazine*, Vol.46, No.3, pp.58-66, 2008.

[2] D.D. Li and J. Hao, "Relay selection in two-hop IEEE 802.16 Mobile Multi-hop Relay networks", *Proc. of International Workshop on Education Technology and Computer Science*, Vol.2, pp. 1007-1011, 2009.

[3] H. Zhang and W.B. Wang, "A cross-layer relay selection algorithm for infrastructure-based two-hop relay networks", *Proc. of International Conference on Communication Software and Networks*, pp.77-81, 2009.

[4] Y.Y. Mao, S.H. Zhang, and W.Y. Zhou, "Joint channel-topology based opportunistic relay selection strategy", *Proc. of International Conference on Wireless Communication & Signal Processing*, pp.1-4, 2009.

[5] S.G. Foss and S.A. Zuyev, "On a Voronoi aggregative process with voronoi clustering", *Advances in Applied Probability*. Vol.28, No.4, pp.965-981, 1996.

[6] Y. Dong, Y. Zhang, M. Song, Y.L. Teng and M. Yi, "Optimal relay location in OFDMA based cooperative networks", *Proc. of 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp.1-4, 2009.

[7] Y. Ge, S. Wen, Y. C. Ling and Y. H. Ang, "Optimal Relay Selection in IEEE 802.16j Multihop Relay Vehicular Networks", *IEEE*

*Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59. Issue. 5, pp.2198-2206, 2010.

[8] A.K. Sadek, Z. Han, and K.J.R. Liu, "Distributed relay-assignment protocols for coverage expansion in cooperative wireless networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol.9, Issue. 4, pp.505-515, 2009.

[9] D. Cox and H. Lee, "Physical Relationships", *IEEE Microwave Magazin*, Vol.9, Issue. 4, pp.89-94, 2008.

[10] Y. Kim and H. Liu, "Infrastructure Relay Transmission with Cooperative MIMO", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 2180-2188, 2008.

[11] V. Erceg, L.J. Greenstein, S.Y. Tjandra, S.R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A.A. Julius, and R. Bianchi, "An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Surban Environments", *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, Vol.17, No.7, pp. 1205-1211, 1999.

[12] IEEE 802.16j-06/13r3, "Multi-hop Relay System Evaluation Methodology (Channel Model and Performance Metric)", Feb. 2007.

[13] WiMAX Forum, "Mobile WiMAX-part 1: A Technical Overview and Performance Evaluation", Aug. 2006.

Zilong Jin



정회원

2009년 8월 Harbin University of Science and Technology 컴퓨터공학과

2011년 8월 경희대학교 컴퓨터공학과 석사

2011년 9월~현재 경희대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 모바일 네트워크, 임베디드 시스템.



조진성 (Jinsung Cho)

중신회원



1992년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사

1994년 서울대학교 대학원 컴퓨터 공학과 석사

2000년 서울대학교 대학원 컴퓨터 공학과 박사

1998년 IBM T.J. Watson

Research Center Visiting Researcher

1999년 9월~2003년 삼성전자 책임 연구원

2003년~현재 경희대학교 컴퓨터공학과 부교수

<관심분야> 모바일 네트워크, 임베디드 시스템.