

# 다중홉 Ad-hoc 환경에서 에너지 효율적인 릴레이 선택 방안

준회원 정 해 범\*, 김 송 희\*, 종신회원 김 덕 경\*\*

## Energy Efficient Relay Selection in a Multi-hop Ad-hoc Environment

Hae-Beom Jung\*, Song-Hee Kim\* Associate Members, Duk-Kyung Kim\*\* Lifelong Member

### 요 약

릴레이를 사용한 시스템에서 최적의 릴레이 위치에 대한 연구가 많이 진행되어 왔지만, 지금까지는 송신단과 릴레이의 전송 전력의 합이 제한된 경우에 전송 용량을 최대화하는 연구가 대부분이었다. 그러나 Ad-hoc 네트워크와 같이 릴레이가 제한된 용량의 배터리를 에너지원으로 사용하는 경우, 에너지 소모를 효율적으로 절약하는 것이 필요하다. 본 논문은 AF(Amplify-and-Forward) 릴레이를 사용한 두 홉 시스템에서 수신단의 신호 대 잡음비가 고정된 경우, 특정 전송 품질을 만족시키기 위해 릴레이에서 사용하는 전력을 최소화하는 최적 릴레이 위치 선정 방안을 제안한다. 모의실험을 통해 Ad-hoc 환경에서의 제안된 기법이 에너지 소모 측면에서 더 효율적임을 보이고, 다중 홉으로 확장된 시스템에서 제안된 기법의 경우 더 낮은 전송실패확률을 갖는 것을 확인한다.

**Key Words** : 릴레이, Ad-hoc, 에너지 효율, 다중홉, 전력할당

### ABSTRACT

There have been lots of researches on the optimal relay selection in relay-based systems. However, most researches have been focused on the maximization of transmission capacity with a constraint of sum power at both transmitter and relays. In Ad-hoc networks where relays have batteries of limited power, it is imperative to minimize the energy consumption while maintaining the required quality-of-service (QoS). In this paper, we propose an optimal relay selection strategy to minimize the relay power consumption while satisfying the required signal-to-noise ratio (SNR). Through intensive simulations, we show the proposed method is more effective in terms of energy consumption and guarantee lower transmission failure probability in multi-hop Ad-hoc environments.

### I. 서 론

무선 및 이동 통신 시스템 발전의 중요한 요소는 향상된 데이터의 신뢰성이다. 그러나 제한된 송신 전력과 높은 경로 손실은 낮은 신호 대 잡음비

(SNR : signal-to-noise power ratio)를 초래하여 오류 증가 및 도달 거리 제한의 문제가 발생하고, 차세대 통신 시스템에서 사용할 것으로 예상되는 고주파 대역의 특성상 음영지역이 증가될 것이다. 이와 같은 문제를 해결하는 방법으로 릴레이를 도입

※본 연구는 한국연구재단 (2010-0022460) 지원으로 수행되었습니다.

\* 인하대학교 정보통신공학과 무선통신연구실(saido@inha.edu) \*\* 인하대학교 정보통신공학부(kdk@inha.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-11-531, 접수일자 : 2011년 11월 16일, 최종논문접수일자 : 2012년 4월 24일

하여 효과적인 통신을 할 수 있다. 릴레이(Relay station)는 음영 지역 해소를 위해 도입된 기술로써, 차세대 이동통신 시스템에서 기지국 증설 비용과 백홀 통신망의 유지 비용을 줄이는 동시에 서비스 커버리지 확대와 데이터 처리율 향상을 위해 반드시 필요한 기술로 평가 받고 있다<sup>11</sup>.

하지만 릴레이를 사용하여 전송하는 경우 릴레이의 전송으로 인해 추가적인 시간 슬롯이 필요하게 되고, 이것은 전체적인 시스템 전송용량의 감소를 가져온다. 따라서 릴레이를 사용하기 위해서는 송신 전력 및 송·수신단 링크의 경로 손실을 고려하여 최적의 성능을 나타내는 지점에 존재하는 릴레이를 선택하는 것이 중요하다.

기존의 많은 연구들이 릴레이의 위치에 대하여 진행되어 왔다<sup>11-31</sup>. Yu<sup>11</sup>등은 릴레이 위치에 대한 전송용량 분석을 두 홉 릴레이 관점에서 수행하였고, Huang<sup>12,31</sup>등은 시스템 전송용량을 최대화하기 위한 최적 릴레이 위치를 제안하였다. 이러한 기술들의 성능을 높이기 위해서는 적응 변조 및 코딩(AMC : Adaptive Modulation and Coding)의 지원이 필수적이고, 송신단에서 추가적인 전력 제어 및 수신단에서 정교한 CQI(Channel Quantity Indicator)피드백이 이루어져야 하지만 한정된 제어 채널에 모든 채널 정보를 피드백 하는 것은 현실적으로 불가능한 문제점이 있다.

Ad-hoc 네트워크와 같이 릴레이가 제한된 용량의 배터리를 에너지원으로 사용하는 경우, 안정된 에너지의 공급이 어렵기 때문에 에너지 소모를 효율적으로 절약하는 것이 필요하다. 또한 Ad-hoc 네트워크의 특성상 기반 통신시설이 갖추어져 있지 않거나 설치가 용이하지 않은 지역 또는 센서 네트워크로 응용되어 왔고, 최근에는 회의장 또는 전시장에서 일시적인 망의 구성이 필요할 때나, 그룹통신, 홉 네트워크 등 실생활에서의 응용이 많이 연구되고 있다. 그러므로 이와 같은 상황에서 적절하게 릴레이를 선택하여 효율적인 통신망을 구축하는 것은 중요한 과제이다<sup>41</sup>.

본 논문에서는 피드백 및 구현 복잡도 등으로 인해 송신단에서는 일정 전력으로 전송하고, 수신단에서는 전송 품질을 만족하는 목표 신호 대 잡음비가 주어진 상황을 가정한다. 이러한 가정을 바탕으로 AF(Amplify-and-Forward) 릴레이에서 사용하는 전력을 최소화시키는 위치 분석을 통하여 에너지 측면에서 더 효율적인 릴레이 선택 기법을 제안한다. 먼저 송신단, 릴레이, 수신단이 있는 두 홉 릴레이

시스템의 경우, 수신단에서 주어진 특정 신호 대 잡음비를 만족시키면서 릴레이의 전력을 최소화 시키는 릴레이의 위치에 대해서 고찰한다. 이를 바탕으로 Ad-hoc 환경에서 임의의 두 사용자가 릴레이를 선택하는 경우, 수신단의 신호 대 잡음비를 최대화하는 기존의 기법과 제안된 기법을 소모 에너지 측면에서 비교한 뒤, 다중 홉 환경으로 확장하여 성능 비교 및 분석을 하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 릴레이 기법에 대하여 설명하고, III장은 제안된 기법을 2 홉과 3 홉 관점에서 기술한다. IV장은 제안된 기법과 기존의 기법을 비교하는 모의실험과 결과에 대하여 고찰한 뒤 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 기존의 릴레이 전송 방식

### 2.1. 다중 홉 릴레이 (Multi-hop Relay)

차세대 이동통신 시스템에서 높은 데이터 전송률을 달성하기 위해서는 고주파수의 대역이 필요하다. 이와 같이 주파수 대역이 높아지는 경우, 전파전파(Wave propagation)특성은 직진성이 높아지게 되고 따라서 도심 건물 등의 인공 지형물로 인한 음영 지역(Shadow zone)이 많이 발생하게 된다. 음영 지역에서 수신되는 신호의 세기는 매우 약하기 때문에 이는 SNR의 저하로 이어진다. 따라서 통신이 가능한 서비스 커버리지가 줄어들어 시스템 전체적인 성능과 서비스 품질의 저하가 발생할 수 있다. 이러한 음영 지역을 줄이기 위해 쉽게 생각할 수 있는 방법은 기지국을 더 많이 설치하는 것이다. 하지만 많은 수의 기지국 설치는 높은 초기 비용을 필요로 하고 백홀링크(Backhaul)의 대역 및 유지에 많은 비용이 들어가기 때문에 경제적 면에서 좋은 대안이 될 수 없다. 이에 해결책으로 제시된 기술이 릴레이를 활용한 방식이다<sup>5,61</sup>.

릴레이는 기지국 추가와 백홀링크의 증설 없이 음영지역의 전송률과 신뢰성을 증가시켜주고 셀 커버리지를 효과적으로 증대시킬 수 있는 기술로서 기지국과 단말 사이를 이어 주는 중계자 역할을 하는 기기이다. 일반적으로 릴레이를 통하지 않고 기지국과 단말이 직접적으로 통신하는 경우 단일 홉(single hop)이라 부르고, 기지국과 단말을 릴레이가 이어주는 경우 홉의 수에 따라 다르지만 일반적으로 다중 홉(multi-hop)이라 부른다. 릴레이의 중계 방식은 크게 두 가지 형태로 릴레이에서 수신한 신호를 복조한 후 다시 변조를 거쳐 전송하는

DF(Decode-and-Forward)기법과 수신된 신호의 복호 없이 단순히 증폭만 시켜 전송하는 AF(Amplify-and-Forward)기법이 있다.

### 2.2. Amplify-and-Forward (AF) 기법

본 논문에서 사용되는 AF 릴레이 기법은 가장 단순한 형태의 릴레이 기법으로 릴레이는 중계기처럼 동작하는 것이 특징이다.

그림 1은 송신단, 수신단, 그리고 릴레이가 존재하는 두 홉 릴레이 시스템 모델이다.  $D$ 는 송신단과 수신단 사이의 거리,  $d_1$ 과  $d_2$ 는 송신단과 릴레이 사이의 거리, 릴레이와 수신단 사이의 거리를 나타낸다. 송신단은 송신 전력  $p_t$ 를 이용하여 릴레이로 전송하고, 릴레이는 수신한 신호를 릴레이의 송신 전력  $p_r$ 로 증폭시킨 후 전송한다. 본 논문에서 가정하는 환경은 이동성이 거의 없는 회의장과 같은 소규모 환경의 Ad-Hoc 네트워크이며, 음영 손실(Shadowing loss)과 페이딩은 고려하지 않고, 경로 손실 만을 고려한다. 상기 환경을 고려했을 때 첫 번째 시간 슬롯에서 릴레이는 송신단으로부터 신호를 수신하게 되고, 릴레이에서 수신한 신호  $y_r$ 은 다음과 같다.

$$y_r = \sqrt{\frac{p_t}{d_1^\alpha}} x + n_r \quad (1)$$

식 (1)에서  $p_t$ 는 송신단의 송신 전력,  $d_1^\alpha$ 는 송신단과 릴레이 사이의 경로 손실,  $x$ 는 전송하는 데이터,  $n_r$ 은 릴레이에서의 잡음이다.

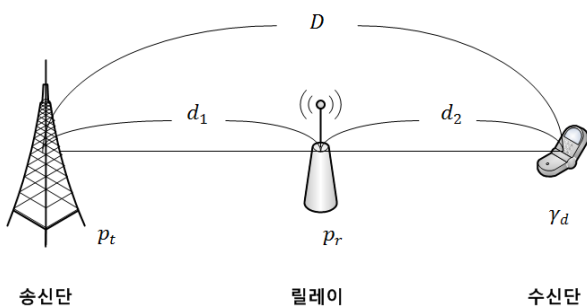


그림 1. 두 홉 릴레이 시스템 모델  
Fig 1. System model regarding two-hop relay

두 번째 시간 슬롯에서 릴레이는 수신한 신호를 증폭하여 수신단으로 전송하게 되고, 이때 AF릴레

이의 증폭 이득  $g$ 와 수신단에서 수신된 신호  $y_d$ 는 다음과 같다.

$$g = \frac{p_r}{\frac{p_t}{d_1^\alpha} + N_0} \quad (2)$$

$$y_d = \sqrt{\frac{g}{d_2^\alpha}} y_r + n_d \quad (3)$$

여기서  $p_r$ 은 릴레이의 전송 전력,  $d_2^\alpha$ 는 릴레이와 수신단사이의 경로 손실,  $n_d$ 는 수신단에서의 잡음,  $N_0$ 는 잡음 전력 밀도를 나타낸다. 식 (2)와 (3)을 통해서 수신단에서의 신호 대 잡음비  $\gamma_d$ 를 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \frac{p_t g}{d_1^\alpha d_2^\alpha \left( \frac{g}{d_2^\alpha} + 1 \right) N_0} \\ &= \frac{p_t p_r}{N_0 p_r d_1^\alpha + d_2^\alpha p_t N_0 + d_1^\alpha d_2^\alpha N_0^2} \quad (4) \end{aligned}$$

### III. 제안하는 릴레이 전송 방식

#### 3.1. 릴레이 전송전력 최소화를 위한 릴레이 위치 분석

식 (4)에서  $p_r$ 로 수식을 표현하기 위해서는 수신단의 신호 대 잡음비  $\gamma_d$ 를 알고 있어야 한다. 앞서 언급된 가정처럼 수신단에서 전송 품질을 만족시키기 위해 목표 신호 대 잡음비  $\gamma_{target}$ 이 주어진 경우,  $\gamma_{target}$ 에 대한 릴레이 전송전력  $p_r$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p_r &= \frac{\gamma_{target} d_2^\alpha p_t N_0 + \gamma_{target} d_1^\alpha d_2^\alpha N_0^2}{p_t - \gamma_{target} N_0 d_1^\alpha} \\ &= \frac{Q + W}{p_t - R} \quad (5) \end{aligned}$$

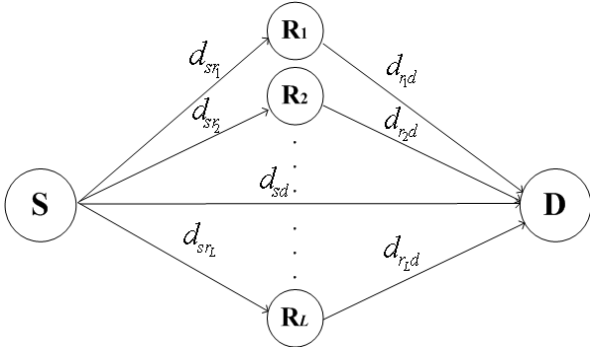


그림 2. 두 홉 Ad-hoc 네트워크 환경  
Fig 2. An illustration of two-hop Ad-hoc network

식 (5)에서 분자의 첫 번째 항을  $Q$ , 두 번째 항을  $W$ , 분모의 두 번째 항을  $R$  로 정의한다.  $d_1^\alpha = d_2^\alpha$  때를 기준으로,  $d_1^\alpha < d_2^\alpha$  인 경우,  $Q$ 는 증가,  $W$ 는 감소,  $R$ 은 감소하고, 일반적으로  $Q \gg W$  이므로  $p_r$ 은 증가한다.  $d_1^\alpha > d_2^\alpha$  인 경우를 고려하면,  $Q$ 는 감소,  $W$ 는 감소,  $R$ 은 증가하므로  $p_r$ 은 감소한다. 따라서  $\gamma_{target} N_0 d_1^\alpha < p_t$ 의 조건을 만족하는 한,  $d_1^\alpha$ 이 증가할수록  $p_r$ 은 점차적으로 감소한다. 그러나  $d_1^\alpha$ 이  $\gamma_{target} N_0 d_1^\alpha < p_t$ 의 조건을 만족하지 못하게 되면, 송신단과 릴레이 사이의 채널이 이미 목표 신호 대 잡음비를 만족할 수 없기 때문에 AF 릴레이를 이용하는 경우 특정 거리 이상에서는 목표 신호 대 잡음비를 만족시킬 수 없는 임계지점이 발생하게 된다. 그러므로 주어진 목표 신호 대 잡음비와 각 링크의 경로 손실을 고려하여 릴레이의 송신 전력이 존재할 조건  $\gamma_{target} N_0 d_1^\alpha < p_t$ 을 만족시키는 동시에 전력을 최소화하는 릴레이의 위치를 찾을 수 있다.

그림 2는 정해진 송신단과 수신단 사이에 임의의 릴레이 후보들이 존재하는 2 홉 Ad-hoc 네트워크의 구성이다<sup>9)</sup>. 여기서 사용 가능한 릴레이의 후보는  $L$  명이 존재하며, 제안된 방식에서  $L$  명의 사용자 중 목표 신호 대 잡음비를 만족시키면서 가장 낮은 릴레이 전송 전력을 갖는 사용자 1명을 선택하여 전송이 시작된다. 식 (5)를 이용하여 상기 모델에 대한  $L$  명의 릴레이 전송전력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{r_k} = \frac{\gamma_{target} d_{r_k d}^\alpha p_t N_0 + \gamma_{target} d_{sr_k}^\alpha d_{r_k d}^\alpha N_0^2}{p_t - \gamma_{target} N_0 d_{sr_k}^\alpha},$$

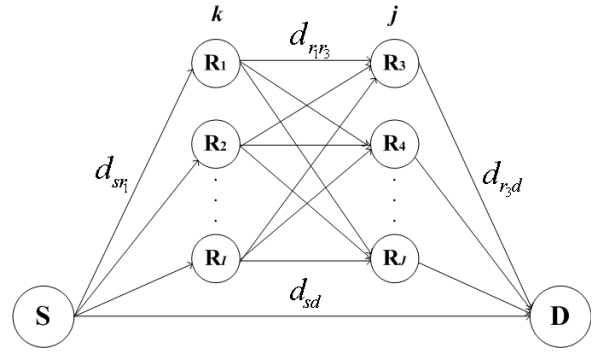


그림 3. 다중 홉 Ad-hoc 네트워크 환경  
Fig 3. An illustration of multi-hop Ad-hoc network

$$k = 1, 2, \dots, L \quad (6)$$

식 (6)에서  $d_{sr_k}^\alpha$  는 송신단과  $k$  사용자의 거리에 대한 경로 손실을 나타내고,  $d_{r_k d}^\alpha$  는  $k$  사용자와 수신단의 거리에 대한 경로 손실을 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 방식은 목표 신호 대 잡음비를 만족시키는 동시에 릴레이에서 사용하는 전력을 최소화시키는 방식이다. 따라서 최소의 릴레이 전송 전력을 갖는 사용자를 선택하는 방식에 대한 문제 형식화(Problem formulation)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \arg k \min p_{r_k} \\ & \text{subject to } p_{r_k} \geq 0, k = 1, 2, \dots, L \\ & \gamma_{d_k} \geq \gamma_{target} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서  $\gamma_{d_k}$ 는  $k$  사용자를 선택하여  $p_{r_k}$ 의 릴레이 전력으로 전송했을 때 수신단의 신호 대 잡음비를 나타낸다. 앞서 언급했던 것과 같이 송신단과 릴레이의 링크에서 경로 손실이 증가할수록  $p_{r_k}$ 는 감소하게 되지만 경로 손실이 과도하게 증가하는 경우 송신단과  $k$  사용자의 링크에서 목표 신호 대 잡음비를 만족시키지 못하기 때문에 양 단 링크에서 목표 신호 대 잡음비를 만족시키기 위해서  $p_{r_k}$ 는 0보다 큰 값을 가져야만 한다.

그림 3은  $L$  명의 사용자 중 2명의 사용자를 릴레이로 선택하여 두 번의 릴레이를 통해 수신단으로 전송하는 3 홉 Ad-hoc 네트워크 모델이다. 본 논문에서 제안하는 다중 홉 환경은 송신단과 수신단을 연결하는 다수의 릴레이들의 송신 전력들의 합이 고정되어 있다고 가정한다. 다음과 같은 3 홉 환경에서 임의의 두 명의 사용자  $k, j$  를 선택하였

을 때 수신단에서의 신호 대 잡음비  $\gamma_{d_{k,j}}$  는 아래와 같다.

$$\gamma_{d_{k,j}} = \frac{g_{r_j} g_{r_k} p_t}{N_0 (d_{sr_k}^\alpha g_{r_j} g_{r_k} + d_{r_k r_j}^\alpha d_{sr_k}^\alpha g_{r_j} + d_{r_j d}^\alpha d_{r_k r_j}^\alpha d_{sr_k}^\alpha)}, \quad \begin{matrix} k = 1, 2, \dots, L \\ j = 1, 2, \dots, L, k \neq j \end{matrix} \quad (8)$$

식 (8)에서  $g_{r_j}$  는  $j$  사용자가 릴레이로 이용될 때의 증폭이득을 나타내고,  $g_{r_k}$  는  $k$  사용자가 릴레이로 이용될 때의 증폭이득을,  $d_{r_k r_j}^\alpha$  는  $k$  사용자와  $j$  사용자 사이의 경로 손실을 나타낸다. 이때, 3홉 네트워크 환경에서 수신단의 신호 대 잡음비를 최대화하는 기존 기법의 문제 형식화를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \arg_{k,j} \max \gamma_{d_{k,j}} \\ & \text{subject to } p_k + p_j \leq p_{total}, k \neq j \\ & \quad p_k \geq 0, p_j \geq 0, \text{ for all } k, j \end{aligned} \quad (9)$$

릴레이에서 사용가능한 총 송신 전력들의 합 ( $p_{total}$ ) 이 제한되어 있기 때문에 식 (9)에서 릴레이로 선택되는 두 명의 사용자  $k, j$  들의 송신 전력 합은 시스템에서 사용할 수 있는 총 송신 전력보다 작거나 같아야한다.

3 홉 환경에서 제안하는 방식은 목표 신호 대 잡음비를 만족시키는 동시에 릴레이로 선택된 두 명의 사용자들의 송신 전력의 합( $p_k + p_j$ ) 을 최소화시키는 방식이다. 따라서 3 홉 네트워크 환경에서 제안된 기법에 대한 문제 형식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \arg_{k,j} \min (p_k + p_j) \\ & \text{subject to } p_k + p_j \leq p_{total}, k \neq j \\ & \quad p_k \geq 0, p_j \geq 0, \text{ for all } k, j \\ & \quad \gamma_{d_{k,j}} \geq \gamma_{target} \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.2. 다중 홉 환경에서 제안하는 기법을 적용하기 위한 알고리즘

3.1절에서 보듯이, 2 홉의 경우에는 총  $L$  명의 사용자 중 임의의 사용자  $k$  가 릴레이로 이용될 때

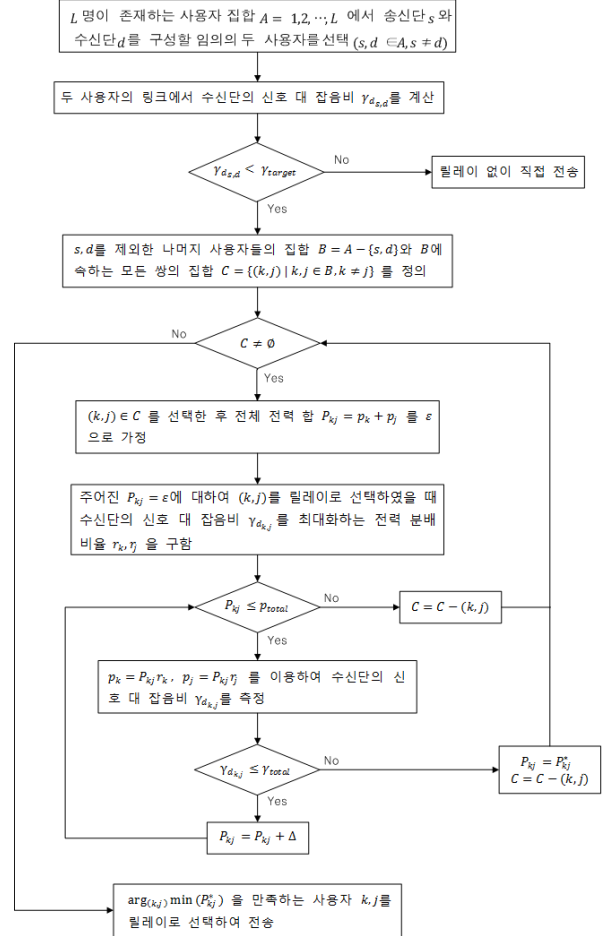


그림 4. 3 홉 환경에서 제안된 기법 릴레이 선택 순서도  
Fig 4. A flowchart of proposed relay selection in 3-hop network

수신단에서의 신호 대 잡음비를 통하여 릴레이의 송신전력  $p_{r_k}$  을 유도할 수 있다. 하지만, 3홉 이상으로 진행되는 경우 수신단의 신호 대 잡음비가 주어지더라도 각 릴레이의 송신전력들을 수식으로 유도할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 다중 홉인 경우 가능한 모든 조합에 대해 비교하여 릴레이들의 송신 전력의 합을 최소화 시키는 조합을 선택하게 된다.

그림 4는 3 홉 환경에서 목표 신호 대 잡음비가 주어진 경우 사용되는 릴레이의 전송 전력을 최소화하는 릴레이를 선택하기 위한 순서도이다. 먼저  $L$  명의 사용자들 중 송신단과 수신단을 구성할 사용자가 결정되면 송신단과 수신단 사이의 신호 대 잡음비를 비교한 후 목표 신호 대 잡음비와 비교하게 된다. 만약 목표 신호 대 잡음비보다 수신단의 신호 대 잡음비가 크거나 같은 경우는 릴레이 없이 직접 전송하게 되고, 목표 신호 대 잡음비보다

표 1. 모의실험 환경  
Table 1. Simulation parameter

파라미터	값
전체대역	10 MHz
송신전력 (송신단)	30 dBm
최대송신전력 (수신단)	30 dBm
잡음 전력 밀도	-174 dBm/Hz
경로 손실 모델	$27.7+40.2\log_{10}(d)$
송신단과 수신단의 거리	600 m

수신단의 신호 대 잡음비가 작은 경우는 나머지 사용자들 중 2명의 사용자를 릴레이로 고려하게 된다. 여기서 릴레이로 고려되는 모든 조합에 대해 비교하여 수신단의 신호 대 잡음비가 목표 신호 대 잡음비를 만족시킬 수 있도록 구성되는 릴레이들의 조합 중 릴레이들의 전송 전력 합을 최소화시키는 조합을 선택하게 된다.

상기 과정을 통하여 목표 신호 대 잡음비를 만족 시킴과 동시에 릴레이 전송 전력의 소모를 최소화 하는 릴레이를 선택할 수 있다. 그러나 제안하는 알고리즘을 적용시키기 위해서는  $(n-2)P_r$  개의 조합에 대하여 일일이 확인해야하므로 큰 복잡도를 유발한다. 따라서 복잡도가 낮은 방식 중,  $(n-2)P_r$  개의 조합 중  $d_{sr_1}, d_{r_1r_2}, d_{r_2d}$  의 합이 가장 작은 조합을 선택하여 알고리즘을 적용시킨 결과를 다음 장에서 추가적으로 비교할 것이다.

#### IV. 제안된 전송 방식의 모의실험

본 절에서는 수신단의 신호 대 잡음비와 릴레이의 전송전력을 바탕으로 기존의 기법과 제안된 기법을 최적의 위치 관점에서 분석한다.

모의실험은 표 1의 파라미터를 사용하였다. 수신단의 신호 대 잡음비를 최대화하는 기존 기법의 경우 최적 릴레이 위치는 송신단과 수신단의 중앙지점이라는 것이 알려져 있다<sup>3,10)</sup>. 따라서 기존 기법을 이용한 시스템에서 릴레이를 최적으로 위치시켜 결정되는 수신단의 신호 대 잡음비는 두 홉 AF 릴레이 시스템에서 달성할 수 있는 최대 수신 신호 대 잡음비  $\gamma_{d_{max}}$  이고 표1의 파라미터를 이용하여 구한 최대 수신 신호 대 잡음비는 13.6635 dB 이다.

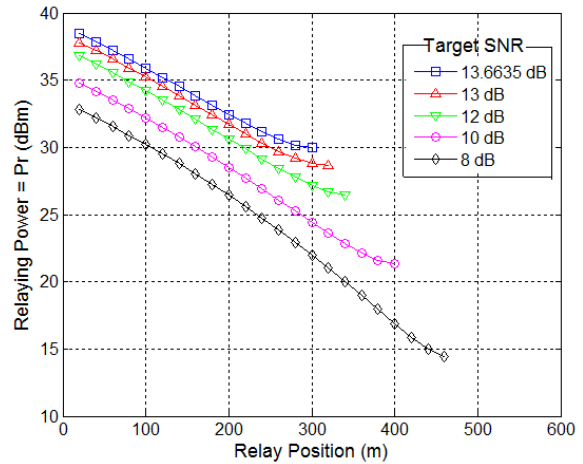


그림 5. 릴레이의 위치에 따라 목표 신호 대 잡음비를 만족하기 위한 릴레이 송신 전력  
Fig 5. Relaying power achieving target SNR relative to relay position

그림 5는 특정 값들로 고정된 목표 신호 대 잡음비를 만족시키는 릴레이의 송신 전력을 릴레이의 위치에 따라 관측한 모습이다. 최대 수신 신호 대 잡음비의 값보다 큰 목표 신호 대 잡음비의 값에 대해서는 주어진 송신 전력으로 만족시킬 수 없기 때문에 그림의 결과를 목표 신호 대 잡음비가 최대 수신 신호 대 잡음비와 같은 경우와 작은 경우로 분석할 수 있다.

목표 신호 대 잡음비가 최대 수신 신호 대 잡음비와 같은 경우, 제한된 송신 전력 내에서 목표 신호 대 잡음비를 만족시키는 위치는 오직 중앙지점 뿐이고, 기존 방법에서 제시한 최적 위치와 일치하는 점을 확인할 수 있다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 기존의 기법에서 수신단의 신호 대 잡음비를 최대화하는 지점이 중앙지점이기 때문이고 제안하는 기법에서 중앙지점을 제외하면 릴레이의 송신 전력이 존재할 조건  $\gamma_{target} N_0 d_1^\alpha < p_t$  을 만족시키는 위치가 존재하지 않기 때문이다. 반면, 목표 신호 대 잡음비가 최대 수신 신호 대 잡음비보다 작은 경우, 목표 신호 대 잡음비가 작아지는 만큼  $\gamma_{target} N_0 d_1^\alpha < p_t$  의 조건을 만족시킬 수 있는  $d_1^\alpha$  은 증가할 수 있고, 송신단과 릴레이 사이의 경로 손실이 증가할수록 릴레이의 송신 전력은 감소하기 때문에 송신 전력을 최소로 소모하는 관점에서 제안된 기법의 최적 릴레이 위치는 수신단 쪽으로 이동하게 되는 것이다.

### 4.2 Ad-hoc 환경에서 최소 소비 에너지 측면의 두 릴레이 선택 기법 비교

이동 Ad-hoc 네트워크는 고정된 기반 망의 도움 없이 이동 노드들 간에 자율적으로 구성되는 망으로서, 네트워크에 자율성과 융통성을 부여한 네트워크이다. 이동 노드는 전파 도달 거리가 제한되므로 중간 노드로서 데이터 전달 기능을 가지며, 배터리를 사용하므로 에너지의 공급이 일정치 않은 특성을 갖고 기지국이나 액세스 포인트와 같은 중재자가 없이 이동 노드들 간에 자체적으로 연결이 설정되므로 임시적 또는 즉흥적인 망의 구성이 가능하다<sup>7,8)</sup>.

본 논문에서는 이러한 Ad-hoc 네트워크 환경에서 가로, 세로가 각각 600m 인 정방형 공간에 사용자들이 임의로 분포되어 있다고 가정한다. 먼저 송신단과 수신단을 구성하는 두 사용자를 선택한 후 다른 사용자들 중 한명을 릴레이로 선택하는 두 홉 릴레이 시스템에서 전체 소모된 에너지를 기존의 기법과 제안된 기법의 관점에서 비교한다. 기존 기법의 경우 수신단의 신호 대 잡음비를 최대화 하는 사용자를 릴레이로 선택하여 전송하고, 제안된 기법에서는 주어진 목표 신호 대 잡음비를 만족시키는 동시에 릴레이의 송신 전력을 최소로 소모하는 사용자를 선택하여 전송했을 때 각각의 전송용량을 측정 후, 10Mbytes의 데이터 전송을 위해 필요한 에너지를 계산하였다.

그림 6은 두 홉 Ad-hoc 네트워크 환경의 직접 전송 확률과 고정된 사용자의 수에 대한 전송 실패 확률을 목표 신호 대 잡음비의 변화에 따라 관측한

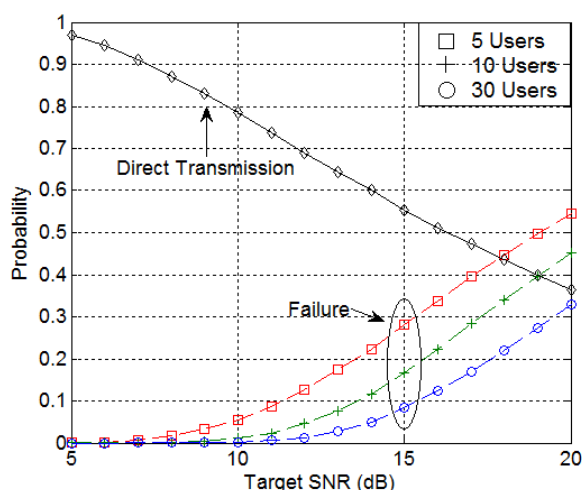


그림 6. 두 홉 Ad-hoc 네트워크 환경의 직접 전송 확률과 전송 실패 확률  
Fig 6. Probabilities of a direct transmission and a failure in two-hop Ad-hoc network

확률을 목표 신호 대 잡음비의 변화에 따라 관측한 그림이다. 전송 실패 확률은 두 홉 Ad-hoc 네트워크 환경에서 릴레이를 이용하더라도 수신단에서 목표 신호 대 잡음비를 만족시키지 못할 경우 발생한다. 전체 사용자의 수가 증가하게 되면 릴레이로 이용 가능한 사용자의 수가 증가하고, 임의의 두 홉 링크에서 주어진 목표 신호 대 잡음비를 만족시킬 수 있는 영역에 릴레이로 이용 가능한 사용자가 존재할 확률이 증가하기 때문에 전송 실패 확률이 감소하게 되는 것이다.

그림 7은 릴레이를 이용한 전송에서 소모된 에너지를 목표 신호 대 잡음비의 변화에 대해 기존의 기법과 제안된 기법을 비교한 결과이다. 상기 결과에서 Max(SNR)은 기존 기법을 나타내고, Min(Pr)은 제안된 기법을 나타낸다. 그림 6의 결과로부터 릴레이를 이용한 전송의 빈도가 직접 전송에 비해 낮다는 것을 알 수 있기 때문에 기존의 기법과 제안된 기법의 차이를 확인하기 위해서 그림 7에서는 릴레이를 이용한 결과만을 고려한다.

그림 7의 결과를 통해서 동일한 목표 신호 대 잡음비에 대하여 제안된 기법의 경우 에너지를 적게 소모하는 것을 확인할 수 있다. 본 모의실험에서 전송 용량은 기존 기법의 경우 최대화된 신호 대 잡음비를 통해 결정되고, 제안된 기법의 경우 목표 신호 대 잡음비를 통하여 결정된다. 반면 릴레이 송신 전력은 기존 기법의 경우 항상 최대로 사용하고, 제안된 기법의 경우 최소화된 전력을 사용하게 된다. 여기서 기존 기법을 통해 얻을 수 있는 전송 용량 이득은 제안된 기법에 비해 점진적으로 증가하게

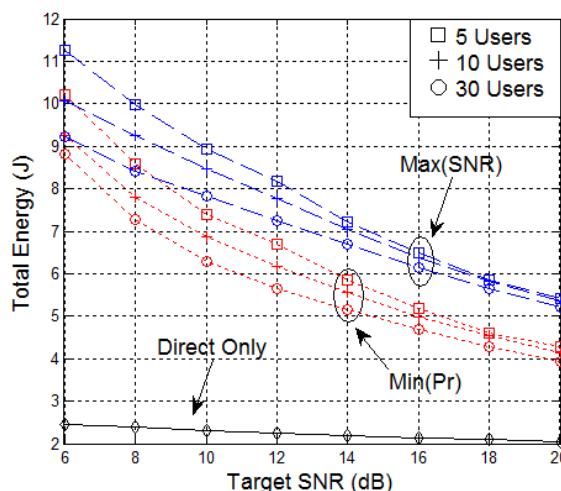


그림 7. 두 홉 Ad-hoc 네트워크 환경에서 릴레이 전송을 통해 소모된 에너지 비교  
Fig 7. Comparison of energy consumption only using relay transmission in two-hop Ad-hoc network

되지만 제안된 기법을 통해 얻을 수 있는 릴레이 송신 전력 이득은 지수 적으로 감소하기 때문에 전송 시간과 전체 전력의 곱으로 계산되는 에너지를 고려할 때 제안된 기법이 더 낮은 에너지를 얻을 수 있는 것이다.

릴레이를 사용한 임의의 전송에서 전체 사용자의 수가 증가할수록 릴레이 후보가 최적위치에 존재할 확률이 높아진다. 최적위치에 가까게 존재할수록 기존 기법에서는 더 높은 신호 대 잡음비를 얻을 수 있고 제안된 기법에서는 더 낮은 전체 전력을 얻을 수 있기 때문에 전체 사용자의 수가 증가할수록 더 낮은 에너지를 소모하는 것이다. 비록 사용자의 수가 증가할수록 전송 실패 확률이 감소하고 전체 에너지 또한 낮게 소모하지만 모든 조합에 대하여 고려하는 제안된 기법의 경우 사용자가 증가할수록 복잡도가 증가하게 된다.

그림 8은 목표 신호 대 잡음비의 변화에 대한 기존의 기법과 제안된 기법의 전체 소모된 에너지 비교 결과이다. 목표 신호 대 잡음비가 낮은 구간에서 소모하는 에너지가 적은 이유는 두 사용자의 직접 링크에서 목표 신호 대 잡음비를 만족시킬 확률이 높고, 이 경우 대부분의 전송은 릴레이의 도움 없이 직접 전송되기 때문이다. 또한 목표 신호 대 잡음비가 증가할수록 릴레이의 의존도가 높아지기 때문에 두 홉 전송의 영향으로 에너지 소모는 증가하게 되지만 목표 신호 대 잡음비가 큰 구간에서는 상대적으로 높은 전송 용량을 얻을 수 있고 데이터 전송에 필요한 시간이 짧기 때문에 에너지 소모는 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다.

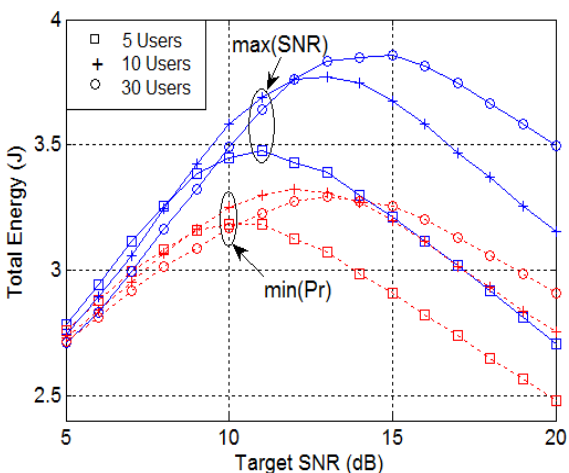


그림 8. 두 홉 Ad-hoc 네트워크 환경에서 전체 소모된 에너지 비교  
 Fig 8. Comparison of energy consumption including direct transmission in two-hop Ad-hoc network

그림 8의 모의실험에서 직접 전송은 기존 기법과 제안된 기법이 동일하게 진행되지만 릴레이를 사용하는 전송에서는 제안된 기법이 기존의 기법보다 더 낮은 에너지를 소모하기 때문에 전체 에너지 소모 관점에서 제안된 기법이 더 낮은 에너지를 소모하는 것이다.

#### 4.3 다중 홉 Ad-hoc 네트워크 환경에서 제안하는 기법의 성능 분석

그림 9는 3 홉 Ad-hoc 네트워크 환경에서 직접 전송 확률과 전송 실패 확률을 목표 신호 대 잡음비에 따라 관측한 결과이다. 30명의 사용자와 전체 릴레이 송신 전력 합을 33dBm 으로 가정하였고 전송 실패 확률은 기존의 기법, 제안된 기법, 제안된 알고리즘을 적용한 최소 거리 합 기법 측면에서 각각 비교하였다.

기존의 기법(Max(SNR))의 경우, 전송에 참여하는 릴레이들은 전체 송신 전력 합을 동등하게 나눠 최대로 전송하고 3 홉 환경에서 가능한 모든 조합들 중 수신단의 신호 대 잡음비를 최대로 달성할 수 있는 조합을 릴레이로 선택한다. 반면, 제안된 기법(Min(Pr))은 가능한 모든 조합을 비교하여 릴레이 송신 전력 합을 최소화하는 조합을 릴레이로 선택하여 전송한다. 최소 거리 합 기법(Distance Sum)은 제안하는 알고리즘을 적용할 때 모든 조합을 탐색해야 하는 복잡도를 줄이기 위하여 각 링크의 거리들의 합이 가장 작은 조합을 선택하여 목표 신호 대 잡음비에 대해 전체 송신 전력 합을 최소화하는 방식이다.

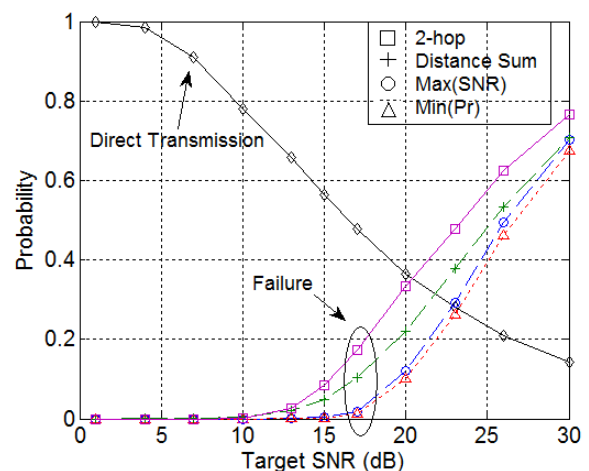


그림 9. 다중 홉 환경의 직접 전송 확률 및 전송 실패 확률  
 Fig 9. Probabilities of a direct transmission and a failure in multi-hop network



3 홉 전송의 경우 릴레이 사용에 대한 추가적인 에너지 소모가 발생하지만 2 홉 전송과 비교하면 전송 실패 확률이 현저히 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 목표 신호 대 잡음비가 높은 경우, 두 홉으로 전송하지 못하는 구간에서 추가적인 릴레이의 활용으로 전송가능하게 되기 때문이다.

최소 거리 합 기법의 경우 모든 경우를 탐색하는 제안된 기법에 비해 구현이 간단하다는 장점이 있지만 전송 실패 확률 측면에서는 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있고 제안된 기법의 경우 전송 실패 확률이 기존의 기법보다 더 낮은 것을 확인할 수 있다.

그림 9의 모의실험에서 전송실패가 발생하는 경우는 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 선택된 두 사용자의 경로에서 2명의 사용자를 릴레이로 활용하는 경우 달성할 수 있는 최대 수신 신호 대 잡음비보다 목표 신호 대 잡음비가 큰 경우. 둘째, 최대 수신 신호 대 잡음비보다 목표 신호 대 잡음비가 작은 경우다. 첫 번째 경우, 최대의 송신 전력을 사용하여 전송하더라도 목표 신호 대 잡음비를 만족시킬 수 없기 때문에 기존의 기법과 제안된 기법 모두 전송 실패가 발생하게 되지만, 두 번째 경우, 목표 신호 대 잡음비를 만족시킬 수 있는 릴레이의 커버리지에 따라 전송 실패 확률이 달라지는데 여기서 제안된 기법이 기존의 기법보다 넓은 커버리지를 갖기 때문에 낮은 전송 실패 확률을 갖는 것이다. 그림 10에서 제안된 기법이 기존의 기법보다 낮은 전송 실패 확률을 갖는 것을 뒷받침해준다.

그림 10은 3 홉 환경에서 주어진 목표 신호 대 잡음비를 만족시킬 수 있는 릴레이의 커버리지를 기존 기법과 제안된 기법에 따라 비교하는 그림이다. 송신단과 수신단사이의 거리는 600m, 목표 신호 대 잡음비는 18dB로 가정하였고, 그림 10의 x축은 첫 번째 릴레이와 두 번째 릴레이 사이의 거리를, y축은 송신단과 첫 번째 릴레이 사이의 거리를 나타내고 있다. 결과를 통해서 확인할 수 있듯이 주어진 목표 신호 대 잡음비를 만족시킬 수 있는 릴레이의 커버리지에 대하여 첫 번째 릴레이의 커버리지는 송신단으로부터 150~260m로 두 기법 모두 동일한 반면 두 번째 릴레이의 커버리지는 기존 기법의 경우, 첫 번째 릴레이로부터 150~260m이고 제안된 기법의 경우, 120~290m로 제안된 기법이 더 넓은 것을 확인할 수 있다.

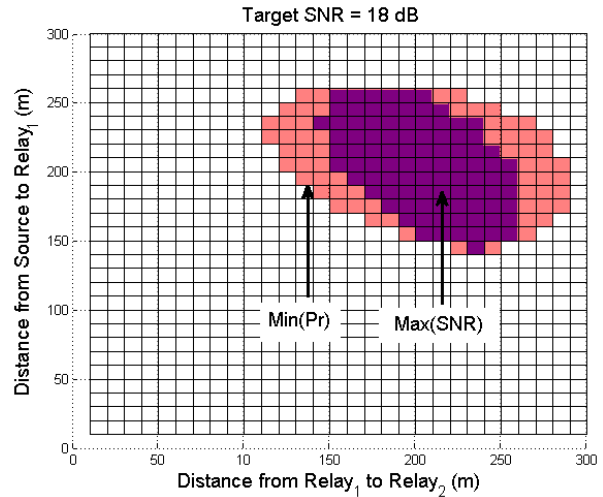


그림 10. 제안된 기법과 기존의 기법의 커버리지 비교  
Fig 10. Comparison of a conventional scheme and a proposed scheme with coverage

본 실험에서 수신단의 신호 대 잡음비를 최대화하는 기존의 기법을 통하여 결정된 최대 수신 신호 대 잡음비는 19.0093dB 이고 이 값이 목표 신호 대 잡음비로 주어지는 경우 기존의 기법과 제안된 기법은 동일한 커버리지를 갖는다. 그러나 최대 수신 신호 대 잡음비보다 목표 신호 대 잡음비가 작게 주어지는 경우 두 기법 간의 커버리지 차이가 발생하게 된다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 최대 수신 신호 대 잡음비가 목표 신호 대 잡음비보다 작게 주어지더라도 기존의 릴레이는 릴레이의 송신 전력을 균일하게 쓰는 것이 항상 최적인 반면 제안된 기법은 릴레이의 위치에 따라 송신 전력을 각각 다르게 분배할 수 있기 때문이다.

그림 10의 모의실험으로부터 목표 신호 대 잡음비가 18dB 일 때 제안된 기법의 경우 기존 기법에 비해 약 68% 커버리지의 증가를 확인하였다. 커버리지가 넓다는 의미는 동일한 릴레이 후보들 중에서 기존의 릴레이 선택기법으로 목표 신호 대 잡음비를 만족시키지 못하더라도 제안된 기법으로 만족시킬 수 있는 가능성이 있다는 것이기 때문에 결과적으로 전송 실패 확률이 낮아지는 것이다.

그림 11은 전체 에너지 소모 관점에서 기존의 기법과 제안된 기법을 목표 신호 대 잡음비에 따라 관측한 결과이다. 30명의 사용자와 전체 릴레이 송신 전력 합을 33dBm 으로 가정하였고 다중 홉에서의 성능을 측정하기 위해 2 홉인 경우와 비교하였다.

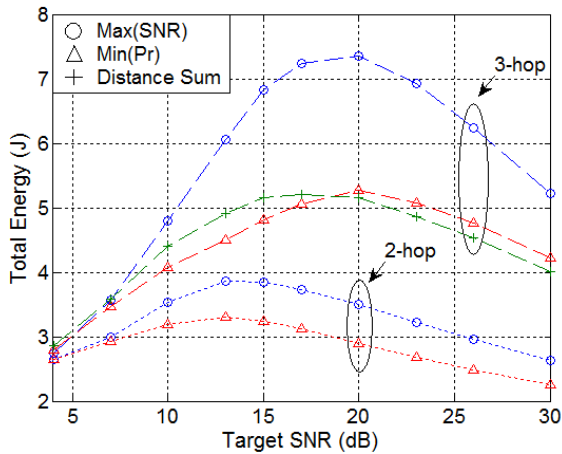


그림 11. 30명의 사용자 환경에서 2 홉과 3 홉의 에너지 비교  
 Fig 11. Comparison of energy consumption between two-hop and three-hop network (30Users)

그림에서 보는 것과 같이 다중 홉으로 진행될수록 에너지 소모가 더 높다는 점을 확인할 수 있다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 릴레이에서 소모하는 추가적인 전력과 시간 슬롯으로 인해 전송률이 떨어지고 그 결과, 더 높은 에너지가 요구되기 때문이다. 2 홉으로 전송하기 위해서 시간 슬롯은 2개가 필요하지만 3 홉의 경우 3개의 시간 슬롯이 요구되므로 릴레이의 사용 빈도가 높아지는 시점부터 에너지 역시 크게 증가하게 된다. 하지만 3 홉의 전송으로 인하여 2 홉에서 전송할 수 없는 높은 목표 신호 대 잡음비영역까지 만족시킬 수 있고, 높은 목표 신호 대 잡음비에서 전송 용량은 크기 때문에 결과적으로 에너지는 다시 감소하는 경향을 보인다. 이러한 3 홉의 결과는 2 홉에서 보여준 결과와 경향이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

목표 신호 대 잡음비가 20dB인 2 홉의 경우, 제안된 기법이 기존의 기법 대비 17% 낮은 에너지 소모를, 3 홉의 경우 28% 낮은 에너지 소모를 보여준다. 따라서 다중 홉으로 진행될수록 제안된 기법의 에너지 효율성이 증가한다고 볼 수 있고 상기 모의실험 결과로부터 릴레이의 전력 최소화 초점을 맞춰 릴레이를 선택하는 경우, 수신단의 신호 대 잡음비 최대화에 초점을 맞춰 릴레이를 선택하는 경우보다 낮은 에너지를 소모하는 동시에 전송 실패 확률 또한 낮은 것을 확인하였다. 특히 최소 거리 합 기법의 경우 기존의 기법보다 전송 실패 확률은 높지만 에너지 소모 관점에서는 제안하는 기법에 근접한 성능을 보여주기 때문에 전송 실패 확률의 차이가 미세한 낮은 목표 신호 대 잡음비 구

간에서는 복잡도를 줄이기 위해 최소 거리 합 기법이 활용될 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 다중 홉 AF 릴레이 환경에서 수신단의 신호 대 잡음비가 고정된 경우, 릴레이의 전력 소모를 최소화하는 릴레이 위치 선정 방안을 제안하였다. 이중 홉 및 삼중 홉 환경에서 전송 성공 확률 및 소모 에너지 측면에서 성능 분석을 수행하였으며, 최대 전력 제한 조건 하에 수신단 신호 대 잡음비를 최대화하는 기존 방식과 성능 비교 분석을 수행하였다. 모의실험을 통하여 사용자가 30명인 경우, 기존 기법에 비해 에너지 소모가 2 홉에서 17%, 3 홉에서 28% 낮은 것을 보였고, 3 홉에서 각 릴레이들의 전송 전력을 다르게 분배함으로써 얻을 수 있는 커버리지 이득을 통하여 기존 기법에 비해 제안된 기법의 전송 실패 확률이 더 낮음을 확인하였다. 제안된 기법의 결과를 통해서 목표 신호 대 잡음비에 따른 전송 실패 확률과 에너지 소모를 고려하여 안정적이면서 저전력 네트워크의 구성이 가능할 것으로 보이고, 제안하는 기법의 복잡도를 줄이는 방안과 다양한 환경에서 최적 릴레이 위치 연구를 추가적으로 진행할 수 있을 것이라 예상된다.

### 참고 문헌

- [1] M. Yu, T.Li, and H. Sadjadpour, "Amplify-forward and decode-forward: The impact of location and capacity contour," *IEEE MILCOM*, vol. 3, pp. 1609-1615, Oct, 2005.
- [2] Z. Sheng, K. K. Leung, Z. Ding, "Cooperative wireless networks: from radio to network protocol designs," *IEEE Comm. Magazine*, vol. 49, Issue 5, pp. 64-69, May, 2011.
- [3] J. H. Huang, L. C. Wang, C.J. Chang, and W.S. Su, "Design of optimal relay location in two-hop cellular systems," *Wireless Networks*, vol. 16, pp. 2179-2189, May, 2010.
- [4] 권혜연 외, "이동 Ad hoc 네트워크 기술 동향," *한국전자통신연구원 전자통신동향분석*, 제 18 권, 2호, pp.11-24, 4월, 2003년.
- [5] 김영일 외, "IEEE 802.16 MMR 동향," *한국전자통신연구원 전자통신동향분석*, 제 21권, 3호 ,

- pp.91-99, 6월, 2006년.
- [6] Ralf Pabst et al., "Relay-Based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio," *IEEE Comm. Magazine*, vol. 42, issue 9, pp. 80-89, Sep. 2004.
  - [7] Charles E. Perkins, *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley, 2001.
  - [8] C.K. Toh, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems*, Prentice Hall PTR, 2002.
  - [9] Y. Ma, R. Tafazolli, Y. Zhang, and C. Qian, "Adaptive Modulation for Opportunistic Decode-and-Forward Relaying," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 7, pp. 2017-2022, July, 2011.
  - [10] 정해범, 김송희, 김덕경 "두 홉 AF 릴레이 시스템에서 에너지 효율적인 릴레이 선택 방안," *한국통신학회 동계종합학술발표회 논문 초록집*, 제 44 권, p. 111, 2월, 2011년.

김 덕 경 (Duk-Kyung Kim)

중신회원



1992년 2월 연세대학교 전기공학과 학사

1994년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 석사

1999년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 박사

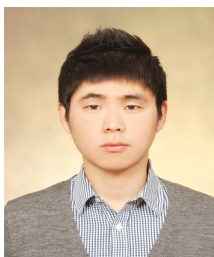
2002년 3월~현재 인하대학교

정보통신공학부 교수

<관심분야> 4G/B4G, RRM, Cognitive radio, MIMO

정 해 범 (Hae-Beom Jung)

준회원



2011년 2월 인하대학교 정보통신공학부 학사

2011년 3월~현재 인하대학교 정보통신공학과 석사과정

<관심분야> LTE-Advanced, RRM, Power Control in HetNet

김 송 희 (Song-Hee Kim)

준회원



2011년 2월 인하대학교 정보통신공학부 학사

2011년 3월~현재 인하대학교 정보통신공학과 석사과정

<관심분야> MIMO, Interference Alignment, Femtocell