

셀 반경 향상을 위한 사용자 릴레이 협력 통신

조성래 | 최 완
한국과학기술원

요 약

최근의 스마트폰의 보급으로 높은 전송률의 다양한 멀티 미디어 서비스가 요구되는 추세이며, 이러한 사용자 단말의 서비스 품질을 보장하기 위해 작은 셀 반경을 갖는 많은 기지국들이 필요하게 되었다. 작은 셀 반경을 통해 사용자 단말과 송신기 사이의 거리를 줄이려는 노력과 더불어 릴레이 협력 통신을 통해 전송률을 높이고 수신 성능을 높이려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 사용자 단말들이 불규칙하게 분포되어 있는 셀룰라네트워크 환경에서 사용자 단말간 협력 통신을 통한 성능 이득을 고찰한다.

1. 서 론

릴레이 협력 통신은 셀 가장자리 및 음영 지역에서 기지국과 단말간의 수신 신호-대-간섭 및 잡음비 저하를 극복하여 셀 경계에서의 성능을 확보하고 경제적인 셀 커버리지 (coverage) 확장을 위한 요소기술로서, IEEE 802.16m 및 3GPP LTE-Advanced 등의 차세대 통신 시스템 규격에 채택되어 활발한 연구가 진행되고 있다.

릴레이 노드 동작 모드는 반-이중화(half duplex) 릴레이 방식과 완전-이중화(full duplex) 릴레이 방식이 있다. 반-이중화 릴레이 방식은 시간 영역 또는 주파수 영역에서 직교(orthogonal) 방식으로 신호를 중계를 하기 때문에 경제적인 기지만, 동기화 등의 복잡도를 수반하고 [1], 송신과 수신

이 분리되어 수행되어야 함으로 다중화 손실이 발생한다. 반면에 완전-이중화 방식 릴레이의 경우, 다중화 손실은 없으나 릴레이에서 송신 신호가 수신신호에 자가간섭(self-interference)으로 작용하여 이를 방지하기 위한 구현상의 문제를 가지고 있다.

최근 릴레이 간의 간섭을 허용하는 비-직교(non-orthogonal) 방식으로 반-이중화 방식의 릴레이를 사용하여 논리적으로 완전-이중화 릴레이를 구현하려는 시도들이 학계에서 진행되고 있다. 대표적으로 Nabar에 의해 제안된 비-직교 중폭 후 재전송(non-orthogonal amplify-forward) 방식 [2] 과 Azarian에 의해 제안된 DDF(dynamic decode-forward) 방식 [3] 이 있다. 비-직교 방식의 효율성을 파악하기 위해 다중화(multiplexing) 이득과 다이버시티 이득의 tradeoff 관계를 규명하려는 노력이 선행되고 있다. 이러한 방식은 비-직교 릴레이 간의 간섭을 줄이기 위해 지리적으로 떨어져 있는 릴레이를 선택해야 하는 복잡도를 요구하고, 릴레이가 여러 개일 경우 최적의 DMT(diversity-multiplexing tradeoff) 와는 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있다 [4]. Tannious가 제안한 다중 홉 릴레이 기법(multi-hop relaying scheme)은 비-직교 릴레이 간의 간섭 문제를 SIC(successive interference cancellation)와 결합 복호(joint decoding) 기법으로 해결하지만 추가적인 채널 정보 획득의 복잡도를 수반한다 [5]. 그 외에도 압축 후 재전송 방식(compressed-forward) 및 양자화 후 재전송 방식(quantized-map) 방식은 높은 DMT를 보장하지만, 역시 구현상의 제약을 피할 수 없다.

반-이중화 방식의 다중화 손실을 감수하더라도, 지리적으로 떨어져 있는 릴레이 노드들을 활용하여 가상의 다중 안

테나(MIMO) 시스템을 구성하는 경우, 최적의 다이버시티를 보장하기 위해서는 최적의 릴레이 노드 위치와 그에 따른 전력 할당을 고려해야 한다. 그렇지 않으면 통상적인 중폭 후 재전송(AF) 방식의 경우 잡음증폭(noise amplification), 복조 후 재전송(DF) 방식의 경우 오류전파(error propagation) 현상으로 인한 성능 저하로 최적의 다이버시티를 보장할 수 없다. 다시 말해, 최적의 릴레이 노드를 선택하고, 선택된 릴레이와의 채널 정보를 고려한 전력 할당을 통해 최적의 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

또한, 지리적으로 다수개의 릴레이가 존재하는 경우, 효율적인 릴레이 선택 기법을 통해 다이버시티 이득을 극대화할 수 있다. [6]에서는 최적의 유효채널(effective channel) 이득을 갖는 하나의 릴레이를 기회적으로 선택(opportunistic relay selection)으로써 최대 다이버시티 이득을 얻는 것을 보여준다. 이러한 방식은 전체 소모 전력을 고려할 때 다수개의 릴레이를 동시에 사용하여 전송하는 경우보다 효율적이라고 알려져 있다 [7]. 최근에는 반-이중화 방식에서의 다중화 손실, 경로 지연, 에너지 손실을 줄이기 위해, 직접 경로(direct path)가 유실된(outage) 경우에만 선택적으로 릴레이를 활용하는 협력자동재전송(cooperative ARQ) 방식에 대한 연구가 관심을 받고 있다. 정보 이론 관점에서 페이딩(fading) 환경에서 협력 자동재전송기법의 다이버시티 이득 상한이 이미 알려져 있다 [8,9]. 참고 문헌 [10]에서는 릴레이가 소스 노드와 시공간부호화(space-time coding)를 통하여 전송하고, 재전송을 통해 얻은 수신 정보를 결합하여 복호함으로써 향상된 다이버시티 이득을 얻는 방법을 제안하고 있다. 하지만, 위의 연구 결과들은 하나의 릴레이를 고려한 세 개의 노드위상환경(three-node topology)의 확정적인 모델(deterministic model)에서 분석되었기 때문에, 임의의 릴레이 위치를 반영하는 네트워크 관점에서의 성능을 파악하는 것은 쉽지 않다.

최근 학계에서는 확률 기하학(stochastic geometry) [11] 기법을 사용하여 통계적으로 불규칙한 노드 위치를 고려해 시스템 관점의 성능을 규명하려는 많은 시도가 이뤄지고 있다. 확률 기하학은 공간상의 불규칙 분포(random spatial pattern)에 대한 연구로서 노드 위치를 통계적으로 모델링하는 틀이다. 예를 들어, 균일 포아송 점 과정(homogeneous Poisson point process, PPP)은 대표적인 공간상의 불규칙

분포로서 단위 면적 당 존재하는 평균 노드 수(units/m²)를 정의하여, 임의의 위치에서 동일한 면적은 동일한 평균 밀도를 갖도록 통계적으로 노드 위치를 모델링한다. 최근에는 이러한 포아송 점 과정을 따르는 노드 위치 모델링 기법은 릴레이 네트워크 [12,13], 애드혹네트워크(ad hoc network) [14,15], 인지(cognitive) 네트워크 [16], 이종(heterogeneous) 네트워크 [17,18] 등의 성능분석에 활용되고 있다.

본 논문에서는 복조 후 재전송(DF) 방식의 릴레이를 활용하여 셀 경계 지역에 위치한 사용자 단말의 QoS(quality of service)를 보장해야 하는 경우, 불규칙하게 분포되어 있는 릴레이 중 가장 최적의 릴레이를 선택하는 방법을 통해 얻을 수 있는 다이버시티 이득을 고찰한다.

본 논문에서는 불규칙적으로 분포하는 저전력 노드 간섭 환경에서, 불규칙하게 분포된 휴지(idle) 상태의 사용자노드들이 릴레이 서비스를 수행하는 사용자 릴레이 협력 통신을 고려하였다. 반-이중화 방식의 사용자 릴레이 노드들이 불규칙하게 분포되어 있는 환경에서, 직접 경로가 유실되었을 때 최적의 사용자 릴레이를 선택하여 재전송을 수행하는 경우, 얻을 수 있는 다이버시티 이득을 유실확률(outage probability) 및 셀 반경 이득의 관점에서 고찰한다.

II. 본 론

본 논문에서 기지국은 BS로 사용자는 MS으로 표시하도록 한다. 전체 N 명의 MS가 셀 내 균일하게 분포되어 있고, 각 MS는 하나의 안테나를 가지고 있다고 가정한다. 여기서 셀 내 동시접속 사용자는 한 명으로 가정하고, BS와 MS 간의 직접 경로가 유실된 경우, 나머지 명의 MS중 복호 집합(decoding set)에 포함된 릴레이가 재전송을 수행한다. 여기서 릴레이와 서비스 MS 간의 채널이 가장 좋은 릴레이가 재전송을 수행한다.

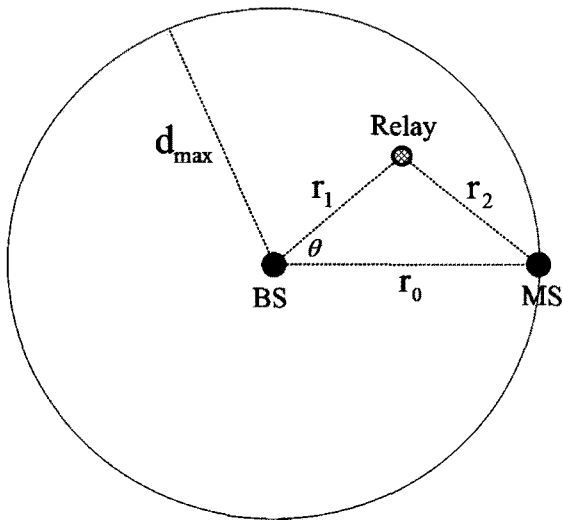
먼저 BS는 다시 $s \in \mathbb{R}^2$ 로 표시하고, 서비스 받는 MS는 $D \in \mathbb{R}^2$ 로 표시한다. 셀은 반지름이 d_{\max} 인 옹골집합(compact set) $W \subset \mathbb{R}^2$ 으로 정의하고, 최대 셀 반경을 살펴보기 위해서 MS는 d_{\max} 에 위치한다고 가정한다. $N-1$ 명의 사용자 릴레이는 이진 점 과정(binomial point process, BPP)에 따라 다음

의 Φ_R 로 정의된다.

$$\Phi_R = \{(R, G_R) : R \in W, G_R \in \mathfrak{R}^+\} \quad (1)$$

인접 간섭 노드들로부터의 간섭환경을 가정하기 위해 간섭 노드는 Φ_R 와는 독립적으로 동작하고, 밀도가 λ 인 아래의 안정성향 포아송 점 과정(stationary PPP) Φ_I 로 다음과 같이 정의한다.

$$\Phi_I = \{(X, g_X) : X \in \mathfrak{R}^2, g_X \in \mathfrak{R}^+\} \quad (2)$$



(그림 1) 사용자 릴레이 협력 통신 ($r_0=d_{max}$, $r_1=d_{SR}$, $r_2=d_{RD}$)

여기서, g_x 는 간섭원 X 와 일반적인 수신단(typical receiver)과의 페이딩 채널 이득 값으로 평균 0, 분산 1의 지수 분포(exponential distribution)를 따른다.

노드 A와 B 사이의 경로 손실은 d_{AB}^α 로 정의한다. 여기서, $d_{AB} = |A-B|$ 은 노드 A와 B 사이의 유클리디언(Euclidean) 거리이고, α 는 2보다 큰 값의 경로 손실 계수(path loss exponent)이다. BS 송신 전력 제어는 고려하지 않으며 셀 간 간섭은 고려하지 않는다. BS는 P_B 의 송신 전력 MS는 P_M 의 송신 전력을 사용하고, 인접 간섭 노드들의 송신 전력 $P_I (\ll P_M \ll P_B)$ 은 이다. 간섭환경이므로 잡음은 무시한다.

1. 직접 경로 Outage 성능

BS에서 d_{SD} 거리만큼 떨어진 MS간의 직접경로의 유실확률은 다음과 같다.

$$P_{out}^{direct}(d_{SD}, \Theta_1) = \Pr\left(\frac{\eta_i G_D d_{SD}^{-\alpha}}{I_{\Phi_I}} < \Theta_1\right) \quad (3)$$

여기서, $d_{SD} \leq d_{max}$, $\eta_i = P_B/P_I$ 이고, G_D 는 BS와 서비스 MS와의 페이딩채널 이득값으로 평균 0, 분산 1의 지수 분포를 따른다. Θ_1 는 전송률 T bps/Hz을 위해 직접 경로에서 요구되는 신호 대 간섭 비이고, $\log(1+\Theta_1)=1$ 로 계산된다. 여기서 T 는 통신 하드웨어나 변조 및 코딩 기법에 따라 결정된다. 임의의 수신단노드에서의 총 간섭전력(aggregate interference power)은 $P_I I_{\Phi_I}$ 가 되고 $I_{\Phi_I} = \sum_{X \in \Phi_I} g_X d_{XB}^\alpha$ 와 같이 정의할 수 있다.

수식 (3)에서 G_D 는 지수분포이므로, 간섭에 대하여 포아송 샷 과정(Poisson shot process)의 라플라스 변환(Laplace transform)을 사용하여 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out}^{direct}(d_{SD}, \Theta_1) &= 1 - E_{I_{\Phi_I}} \left[\exp\left(-\frac{\Theta_1 d_{SD}^\alpha I_{\Phi_I}}{\eta_i}\right) \right] \\ &= 1 - L_{I_{\Phi_I}}\left(\frac{\Theta_1 d_{SD}^\alpha}{\eta_i}\right) \\ &= 1 - \exp\left(-\lambda_i C \Theta_1^{(2/\alpha)} \eta_i^{-(2/\alpha)} d_{SD}^2\right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $C = 2\pi^2 / \alpha \sin(2\pi/\alpha)$ 로 정의한다(수식 (4)의 유도는 [19] 참고). 따라서 직접 경로의 유실확률이 요구되는 유실 허용치 $\epsilon \in (0,1)$ 를 만족하는 조건에 따라 최대 셀 반경 d_{max} 은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} d_{max} &= \{d : P_{out}^{direct}(d, \Theta_1) \leq \epsilon\} \\ &= \left(\frac{-\ln(1-\epsilon)}{\lambda_i C \Theta_1^{(2/\alpha)} \eta_i^{-(2/\alpha)}}\right)^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

2. 사용자 릴레이 협력 통신

(그림 1)에서와 같이, MS가 복호에 성공하지 못할 경우, 복호에 성공한 릴레이 중 가장 채널 이득이 좋은 사용자 릴레이를 활용하여 재전송을 받게 된다. 아래의 조건을 만족하는 경우 사용자 릴레이 복호 집합 D 로 정의할 수 있다.

$$D = \left\{ R \in \Phi_R : \frac{\eta_1 G_R d_{SR}^{-\alpha}}{I_{\phi_1}} \geq \Theta_2 \right\} \quad (6)$$

여기서, 사용자 릴레이 협력 통신은 목적지 노드가 NACK 신호를 보내는 경우에만 동작하기 때문에, 직접 경로가 성공하는 경우, Θ_2 을 얻지만, 실패하는 경우, $\Theta_2/2$ 의 효율을 얻는다 [20]. 따라서, 직접 경로와의 효율성 비교 측면에서, 아래의 조건을 만족하는 Θ_2 을 사용하고자 한다.

$$\Theta_2 \left(1 - P_{out}^{direct}(d_{SD}, \Theta_1) \right) + \frac{\Theta_2}{2} P_{out}^{direct}(d_{SD}, \Theta_1) \rightarrow \Theta_1$$

그러므로,

$$\Theta_2 = 2\Theta_1 \left\{ 1 - P_{out}^{direct}(d_{SD}, \Theta_1) \right\}^{-1}$$

라고 정의한다.

수식 (6)에 기인하여 사용자 릴레이 집합 D 는 더 이상 안정 성향 이진 점 과정을 따르지 않지만, 임의의 사용자 릴레이가 성공적으로 복호할 확률은 동일독립분포 변수로서, 복호 집합 크기(cardinality)는 다음과 같다.

$$|D| = \sum_k^{N-1} k \binom{N-1}{k} \Pr(R \in D)^k (1 - \Pr(R \in D))^{N-k-1} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Pr(R \in D) &= \frac{1}{|W|} \int_W \Pr \left(\frac{\eta_1 G_D r_1^{-\alpha}}{I_{\phi_1}} \geq \Theta_2 \right) r_1 dr_1 \\ &= \frac{2}{d_{max}^2} \int_0^{d_{max}} \exp \left(-\lambda_1 C \eta_1^{(-2/\alpha)} \Theta_2^{(2/\alpha)} r_1^2 \right) r_1 dr_1 \\ &= \frac{1 - \exp \left(-\lambda_1 C \eta_1^{(-2/\alpha)} \Theta_2^{(2/\alpha)} d_{max}^2 \right)}{\lambda_1 C \eta_1^{(-2/\alpha)} \Theta_2^{(2/\alpha)} d_{max}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

직접 경로가 실패하여 MS가 NACK 신호를 보낼 때, 잠재적인 릴레이는 비균일 이진 점 과정 $\tilde{\Phi}_R$ 를 따른다.

$$\tilde{\Phi}_R = \left\{ (R, \tilde{G}_R) : R \in D, \tilde{G}_R \in \mathfrak{R}^+ \right\} \quad (9)$$

여기서, \tilde{G}_R 는 복호집합에 포함된 각 사용자 릴레이와 서비스 MS 간 획득된 채널 이득값으로, 평균 0, 분산 1의 지수 분포를 따르는 변수이다. 구현상으로 주기적인 ACK/NACK 신호를 바탕으로 용이하게 얻을 수 있다. 예를 들어, NACK 신호로부터 측정된 신호-대-간섭 비 세기가 β 보다 큰 경우에 한해서 서비스 MS를 위한 재전송에 참여하는 사용자 릴레이 집합은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F(\beta) = \left\{ R \in \tilde{\Phi}_R : \frac{\eta_2 \tilde{G}_R d_{RD}^{-\alpha}}{I_{\phi_1}} \geq \beta \right\} \quad (10)$$

여기서, $\eta_2 = P_M/P_1$ 이고 β 는 Θ_2 보다 큰 릴레이 선택 피드백 임계값(feedback threshold)으로 설정하는 것이 바람직하다. 만약 β 가 0으로 설정되는 경우 $\tilde{\Phi}_R$ 과 동일한 복호에 성공한 모든 사용자 릴레이 집합을 의미한다. β 가 Θ_2 보다 작게 설정되면 릴레이와 MS 간에 신호-대-간섭비가 Θ_2 보다 작은 릴레이를 선택하는 확률이 0보다 크게 된다.

균일하게 분포하는 간섭원 가정에 따라 각 사용자릴레이에서 받는 총 간섭 전력 I_{ϕ_1} 은 MS에서 겪는 총간섭과 통계적으로 동일하다. 뿐만 아니라, 임의의 시간과 노드 위치에 따른 총 간섭은 서로 독립적이라고 가정한다. 아래 수식 (11)은 임의의 사용자 릴레이가 수식 (10)의 재전송 참여 릴레이 집합에 포함될 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pr(R \in F(\beta)) &= \frac{1}{|W|} \int_0^{d_{max}} \int_0^{2\pi} \Pr \left(\frac{\eta_2 \tilde{G}_R r_2(\phi)^{-\alpha}}{I_{\phi_1}} \geq \beta \right) \Pr \left(\frac{\eta_1 G_R r_1^{-\alpha}}{I_{\phi_1}} \geq \Theta_2 \right) r_1 dr_1 d\phi \\ &= \frac{1}{\pi d_{max}^2} \int_0^{d_{max}} \int_0^{2\pi} \exp \left(-\lambda_1 C \left(\eta_1^{(-2/\alpha)} \Theta_2^{(2/\alpha)} r_1^2 + \eta_2^{(-2/\alpha)} \beta^{(2/\alpha)} r_2(\phi)^2 \right) \right) r_1 dr_1 d\phi \\ &= \Psi(r_0, \beta) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $r_2(\phi) = \sqrt{r_1^2 + r_0^2 - 2r_0 r_1 \cos(\phi)}$ 이다. 수식 (4)와 (11)를 이용하여, N-1명의 사용자 릴레이를 활용하는 경우 아래의 유사확률을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out}^{relay}(d_{max}, \Theta_2, N, \beta) &= P_{out}^{direct}(d_{max}, \Theta_2) (1 - \Pr(R \in F(\beta)))^{N-1} \\ &= \left\{ 1 - \exp \left(-\lambda_1 C \Theta_2^{(2/\alpha)} \eta_1^{(-2/\alpha)} d_{max}^2 \right) \right\} (1 - \Psi(d_{max}, \beta))^{N-1} \end{aligned} \quad (12)$$

수식 (12)가 ϵ 을 만족하는 조건을 통해 요구되는 사용자 릴레이 개수를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$n_{\text{req}} = \left\{ n : P_{\text{out}}^{\text{relay}}(d_{\text{max}}, \theta_2, n, \beta) \leq \epsilon \right\} = 1 + \log_{1-\Psi(d_{\text{max}}, \beta)} \epsilon_R \quad (13)$$

여기서, $\epsilon_R = \epsilon P_{\text{out}}^{\text{direct}}(d_{\text{max}}, \theta_2)^{-1}$ 이다. 수식 (13)에서 얻은 n_{req} 값이 주어진 N 값 보다 큰 경우, QoS를 만족할 수 없지만, N 값 보다 작은 경우 사용자 릴레이는 다음의 확률로 협력에 참여해야 한다.

$$p_{\text{req}} = \min \left\{ 1, \frac{n_{\text{req}} - 1}{N - 1} \right\} \quad (14)$$

따라서, 최대 셀 반경은 P_{req} 가 1이 되는 지점에 해당하고 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$d_{\text{max}} = \max \left\{ d : P_{\text{out}}^{\text{relay}}(d, \theta_2, N, \beta) \leq \epsilon \right\} \approx \max^{(a)} \left\{ d : (1 - \Psi(d, \beta))^{N-1} \leq \epsilon \right\} \quad (15)$$

여기서, (a)에서 d_{max} 는 N 이 커질 수록 $\epsilon_R \rightarrow \epsilon$ 가 되므로, 결국 릴레이 경로의 성능에 따라 결정되는 것을 알 수 있다.

III. 성능 분석

성능 평가에 사용된 파라미터 중 η_1 는 5 dB, η_2 는 3 dB로 고정된 값으로 설정하였다. 이 값들은 최적의 릴레이 위치를 가변시키고, 사용자 릴레이와 소스 및 목적지 간의 채널 이득 값에 영향을 주게 된다. β 는 θ_2 와 동일하게 설정하였고, 간섭 노드 밀도 λ_s 는 10^5 units/m²로 설정하였다.

먼저 직접 경로, 최적의 위치에 있는 릴레이를 사용하는 경우, 불규칙하게 분포해 있는 사용자 릴레이를 사용하는 경우의 성능을 비교해보고, QoS를 만족하기 위해 요구되는 사용자 릴레이 참여 확률에 대해 알아보려고 한다.

최적의 사용자 릴레이 위치를 얻기 위해서는, 유실 확률을

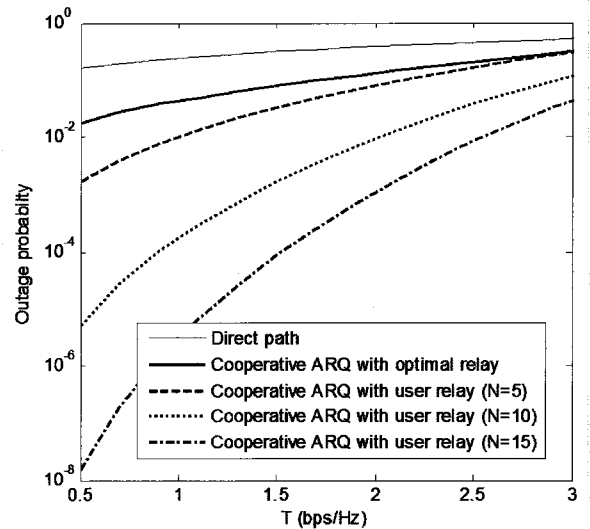
최소화시킬 수 있도록 수식 (11)에서 거리에 관련된 부분을 최소화하면 된다. 따라서 릴레이 노드가 소스 노드와 목적지 노드 사이의 직선 거리에 있다고 가정하면 다음의 수식을 최소화하는 거리 x 의 위치를 구하면 된다.

$$\operatorname{argmin}_x Ax^2 + B(d_{\text{max}} - x)^2 \quad (16)$$

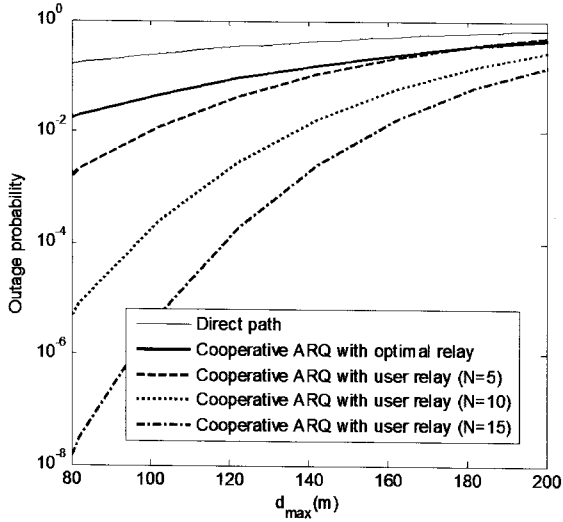
여기서, $A = \eta_1^{(-2/\alpha)} \theta_2^{(2/\alpha)}$, $B = \eta_2^{(-2/\alpha)} \beta^{(2/\alpha)}$. 수식 (16)를 미분하면 x 를 쉽게 얻을 수 있다. 결국 릴레이 노드가 다음의 직선 거리 위치에 있는 경우 최적의 성능을 얻을 수 있다.

$$d_{\text{SR}}^* = \frac{A}{A+B} d_{\text{max}}, \quad d_{\text{RD}}^* = \frac{B}{A+B} d_{\text{max}} \quad (17)$$

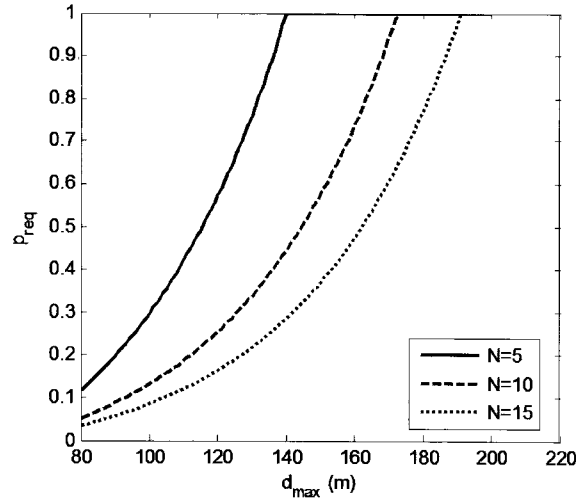
(그림 1) 및 (그림 2)에서 보여지는 것과 같이, 전송률과 셀 반경에 커질수록, 유실확률이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 하나이상의 사용자 릴레이를 활용하는 경우, 참여하는 릴레이 개수가 증가할수록 성능이 개선되는 것을 알 수 있다. 하지만, (그림 3)에서 알 수 있듯이, 셀 반경이 커지거나 전송률이 높아질수록, 임의의 릴레이가 복호 집합에 포함될 확률이 낮아지므로, 실제 참여하는 릴레이 집합의 크기가 작아져, 성능 개선의 효율이 떨어지는 것을 짐작할 수 있다.



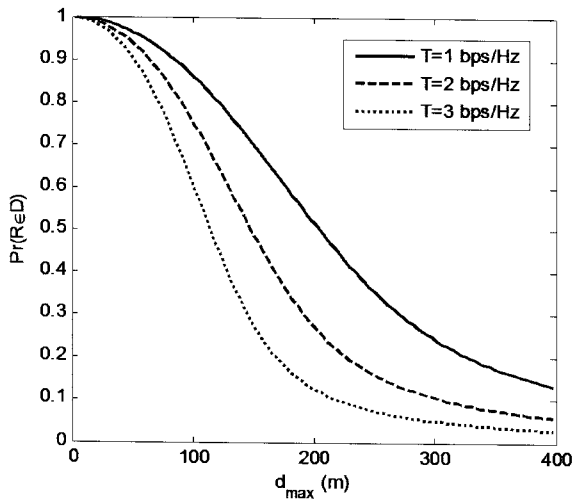
(그림 2) 전송률에 따른 outage 확률 (=100 m)



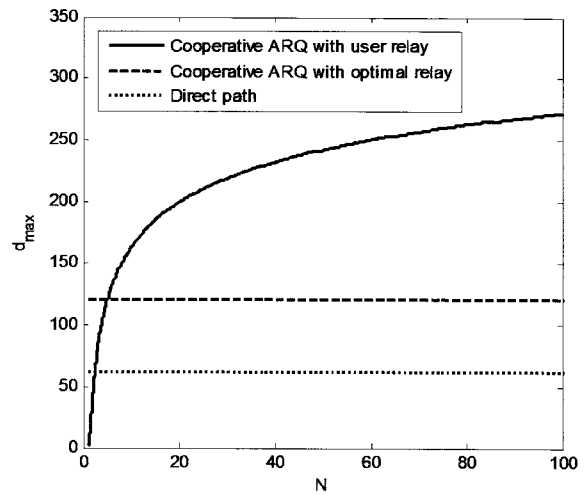
(그림 3) d_{max} 에 따른 outage 확률 ($T=1$ bps/Hz)



(그림 5) d_{max} 에 따른 사용자 릴레이 참여 확률 ($T=1$ bps/Hz)



(그림 4) d_{max} 에 따른 복호집합에 포함될 확률



(그림 6) 사용자 릴레이 개수 N 에 따른 최대 셀 반경 ($T=1$ bps/Hz)

(그림 4)는 셀 반경에 따른 사용자 릴레이에 참여 확률을 나타낸다. P_{req} 가 1을 초과하는 경우 전송률을 낮추거나, 간섭원을 줄이지 않으면 추가적인 사용자 릴레이를 필요로 한다. 하지만 사용자간 다중화 손실로 인해 결국 전송률을 감소시키는 요인이 된다. 결국, 간섭원 밀도와 참여하는 사용자 릴레이 집합의 크기에 따라 전송률을 최적화하는 최대 셀 반경이 결정되는 것을 미루어 짐작할 수 있다.

(그림 5)는 사용자 릴레이 집합 크기에 따라 최대 셀 반경이 개선되는 것을 보여준다. 참여 릴레이 개수가 20 개 안팎으로 작은 경우, 셀 반경이 크게 개선을 보이는 반면, 셀 반경이 커질수록 (그림 3)의 결과로 미루어 짐작해 볼때, 원천적으로 복호 확률이 저하됨으로써 셀 반경이 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 간섭원이 산재해 있는 셀룰라 네트워크 환경에서, 사용자 릴레이의 협력 전송을 통해 outage 확률이 개선되고 궁극적으로 셀 서비스 반경이 향상되는 것을 살펴 보았다. 하지만, 셀 반경이 커질수록, 복호 집합 크기가 원천적으로 줄어들기 때문에, outage 개선 효율이 떨어지는 것을 알 수 있다. 결국, 사용자 단말 간 협력 전송은 사용자 간 다중화 손실이 고려되어야 하므로, 전송률과 서비스 QoS가 주어질 때 최대 셀 반경이 결정되는 것을 알 수 있다. 셀 반경이 커질 때, 릴레이의 복호 확률을 향상시키기 위해서는 다중 안테나, 다중 홉 릴레이 방식, 보호 구역 [21]을 적용하여 간섭원을 차단하는 방법 등의 추가적인 개선을 필요로 한다.



- [1] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Info. Theory.*, vol. 49, no. 10, Nov. 2003.
- [2] R. U. Nabar, H. Bolcskei, F. W. Kneubuhler, "Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 22, no. 6, pp. 1099-1109, Aug. 2004.
- [3] K. Azarian, H. El Gamal, and P. Schniter, "On the achievable diversity-multiplexing tradeoff in half-duplex cooperative channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 12, pp. 4152-4172, Dec. 2005
- [4] Sheng Yang, J. C. Belfiore, "Towards the optimal amplify-and-forward cooperative diversity scheme," *IEEE Trans. Info. Theory.*, vol. 53, no. 9, pp. 3114-3126, Sep. 2007
- [5] R. Tannious and A. Nosratinia, "Spectral-efficient relay selection with limited feedback," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 26, no. 8, pp. 1419-1428, Oct. 2008
- [6] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 9, pp. 659-672, Mar. 2006.
- [7] A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win, "Cooperative communications with outage optimal opportunistic relaying," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 9, Sep. 2007.
- [8] T. Tabet, S. Dusad, and R. Knopp, "Diversity-multiplexing-delay tradeoff in half-duplex ARQ relay channels," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 53, pp. 3797-3805, Oct. 2007.
- [9] L. Weng and R. D. Murch, "Achievable diversity-multiplexing-delay tradeoff for ARQ cooperative broadcast channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 5, pp. 1828-1832, May 2008.
- [10] S. Lee, W. Su, S. Batalama, J. D. Matyjas, "Cooperative Decode-and-Forward ARQ Relaying: Performance Analysis and Power Optimization," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 9, no. 8, pp. 2632-2642, Aug. 2010.
- [11] D. Stoyan, W. Kendall, and J. Mecke, *Stochastic geometry and its applications*. Chichester: Wiley, 1995.
- [12] Z. Sheng, Z. Ding and K. K. Leung, "Transmission capacity of decode-and-forward cooperation in overlaid wireless networks," *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC) 2010*, May 23-27, Cape Town, South Africa
- [13] A. K. Sadek, Han Zhu, K. J. R. Liu, "Distributed relay-assignment protocols for coverage expansion in cooperative wireless networks," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 9, no. 4, pp. 505-515, Apr. 2010
- [14] M. Haenggi, "Outage, local throughput, and capacity of random wireless networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, pp. 4350-4359, Aug. 2009.
- [15] S. P. Weber, X. Yang, J. G. Andrews, and G. de Veciana, "Transmission capacity of wireless ad hoc

- networks with outage constraints," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, no. 12, pp. 4091-4102, Dec. 2005.
- [16] N. Devroye, M. Vu, and V. Tarokh, "Achievable rates and scaling laws for cognitive radio channels," EURASIP J. Wirel. Commun. Netw., 2008(2):1-12, 2008.
- [17] K. Huang, Vincent K. N. Lau, Yan Chen, "Spectrum sharing between cellular and mobile ad hoc networks: transmission-capacity trade-off," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 27 no. 7, p. 1256-1267, Sep. 2009.
- [18] Y. Kim, S. Lee, D. Hong, "Performance analysis of two-tier femtocell networks with outage constraints," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 9, no. 9, pp. 2695-2700, Sep. 2010.
- [19] F. Baccelli, B. Blaszczyszyn, and P. Muhlethaler, "An Aloha protocol for multihop mobile wireless networks," IEEE Trans. Info. Theory, vol. 52, no. 2, pp. 421-436, Feb. 2006.
- [20] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," IEEE Trans. Info. Theory, vol. 50, no. 12, Dec. 2004.
- [21] A. Hasan and J. G. Andrews, "The guard zone in wireless ad hoc networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 6, no. 3, pp. 897-906, Dec. 2005.

약 력



조 성 래

2001년 Canterbury 대학교 전기 및 컴퓨터 공학 학사
 2004년 Canterbury 대학교 전기 및 컴퓨터 공학 석사
 2004년 ~ 2007년 한국전자통신연구원(ETRI) 연구원
 2007년 ~ 현재 한국과학기술원 전자공학 박사과정
 관심분야 : 협력 통신, 애드혹네트워크, 셀룰러네트워크, 확률 기하학



최 완

1996년 서울대학교 전자공학 학사
 1998년 서울대학교 전자공학 석사
 2006년 텍사스오스틴 대학교(The University of Texas at Austin) 전기 및 컴퓨터 공학 박사
 1998년 ~ 2003년 KTF
 2007년 ~ 현재 한국과학기술원 부교수
 관심분야 : 통신이론 및 정보이론