

다중-홉 다중-릴레이 무선 통신 시스템에서 최적 경로 선택 기법의 성능 한계

준회원 카몰 아물라도프*, 학생회원 박진배*, 종신회원 김윤희*

A Performance Bound of Multi-hop Multi-Relay Wireless Communication Systems with Optimal Path Selection

Kamol Almuradov* Associate Member, Jin Bae Park* Student Member, Yun Hee Kim* Lifelong Member

요약

최근 다중-홉 릴레이 전송 방식은 전력 소모를 줄이면서 통신 가능 영역을 넓힐 수 있는 장점으로 큰 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 홉마다 증폭-후-전달 릴레이가 다수 존재하는 다중 홉 통신 시스템에서 최적 경로를 선택할 때 얻을 수 있는 성능 한계를 유도한다. 특히, 홉마다 분포가 다른 일반화된 나카가미 페이딩 채널에서의 성능 한계를 제공하도록 경로를 구성하는 링크 신호대잡음비의 기하 평균 상한을 적용하고 그에 대한 적률생성함수를 얻었다. 그 결과 페이딩 특성이 적을수록 제안한 기하 평균 상한 기법이 실제 성능에 더욱 근접함을 볼 수 있다.

Key Words : Multi-hop communications, path selection, amplify-and-forward, relay, Nakagami fading

ABSTRACT

Recently, multi-hop relay transmission has drawn much attention owing to its advantage of coverage extension at low power consumption. In this paper, we derive a performance bound of multi-hop communication systems with multiple amplify-and-forward relays when the optimal path is selected. The bound is derived in generalized Nakagami fading channels with different parameters for each hop by applying the geometric mean bound to the path signal-to-noise ratio (SNR) and obtaining the moment generation function of the bound. It is shown that the bound based on the geometric mean is closer to the actual performance of optimal path selection when the fading effect is small.

1. 서론

최근 전력 소모를 줄이면서 통신 가능 범위를 넓히는 방법으로 다중-홉 무선 전송 방식에 대한 관심이 증가하고 있다. 다중-홉 전송 방식의 가장 큰 특징은 신호를 목적 노드까지 한 번에 바로 전송하는 대신 중간 릴레이 노드를 거쳐 여러 홉으로 전송함으로써 거리에 의한 경로 손실을 보상하는 것이다^[1]. 이 때 원

천 노드와 목적 노드까지 릴레이가 다수 존재하여 목적 노드까지의 채널이 다수 존재하면 이러한 채널을 활용함으로써 다양성 이득을 얻을 수 있다^[2].

한편 릴레이 노드가 신호를 전달하는 방법으로 크게 증폭-후-전달 (Amplify-and-Forward) 방식, 복호-후-전달 (Decode-and-Forward) 방식, 그리고 압축-후-전달 (Compress-and-Forward) 방식이 있다^[3]. 이 가운데 증폭-후-전달 방식은 릴레이 구현 단가가 낮고

※ 본 논문은 정부(교육과학기술부) 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업과 (No.2010-0010664) 중견연구자사업(No.2008-0061488)의 지원으로 수행된 연구결과임.

* 경희대학교 전자전파공학과 (kamol_almuradov@yahoo.com, bubilife@khu.ac.kr, yheekim@khu.ac.kr)
논문번호 KICS2010-10-469, 접수일자 : 2010년 10월 4일, 최종논문접수일자: 2010년 12월 13일

릴레이에서 시간 지연이 없어 저비용 시스템 구축에 많이 적용되고 있다. 그에 따라 릴레이 성능 분석도 활발히 진행되었으나 주로 분석이 용이한 이중-홉 환경에서 진행되었으며 복잡한 다중-홉 환경에서의 성능 분석은 아직 미미한 편이다.

다중-홉 무선 통신 시스템에 대한 성능 분석은 먼저 홉마다 단일 릴레이가 존재하는 N -홉 시스템에서의 심볼오류를 유도로부터 시작되었다^{1,4,6}. 홉마다 단일 릴레이가 존재하는 가장 단순한 다중-홉 시스템 모형에서도 증폭-후-전달로 신호를 전송하면 최종 목적 노드에서의 신호대잡음비가 복잡한 꼴로 나오기 때문에 그 분포를 정확하게 유도하기가 어렵다. 따라서, 대부분의 연구는 신호대잡음비의 상한에 대한 분포를 유도하여 성능 분석에 활용하였다^{1,5-6}.

한편, 이중-홉 환경에서 다중 릴레이가 존재할 경우 채널상태정보를 이용하여 채널이 좋은 릴레이로 신호를 전달하여 성능을 향상시키는 선택 다양성 방법이 제안되었다^{7,8}. 이러한 릴레이 선택 개념을 다중-홉 다중-릴레이 환경으로 확장하면, 원천 노드에서 목적 노드까지 모든 가능 경로에 대한 채널 품질을 조사하고 채널 품질이 가장 좋은 경로로 신호를 전달해야 한다. 이러한 경로 선택 기법에 대한 연구가 최근⁹에서 진행되었는데, 최적 경로 선택 기법의 복잡도를 줄이는 준최적 경로 선택 기법을 제시하고 복호-후-전달 릴레이로 신호를 전달할 때의 아웃티지 확률을 근사적으로 유도하였다.

본 논문에서는 이러한 경로 선택 기법을 증폭-후-전달 릴레이 시스템에 적용할 때 얻을 수 있는 심볼오류율 성능 한계를 분석한다. 홉마다 동일한 분포의 릴레이 페이딩을 가정한 기존 연구⁹와는 달리 홉마다 분포가 다른 나카가미 페이딩 채널을 고려하였으며,

조화 평균과 기하 평균의 관계 및 적률을 이용한 분석 방법을 제시하였다. 본 논문에서 얻은 적률과 적률생성함수의 근사식은 임의의 변조 방식에 대한 심볼오류율을 도출하는데 활용할 수 있다.

이후 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 다중-홉 다중-릴레이 무선 통신 시스템 모형과 그에 따른 경로 신호대잡음비를 정의하고, III장에서 최적 경로 신호대잡음비의 상한에 대한 적률을 유도한다. 이로부터 얻은 심볼오류율 성능 한계와 실제 모의실험으로 얻은 성능을 IV장에서 비교 분석하며, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 다중-홉 다중-릴레이 무선 통신 시스템

그림 1은 고려하는 N -홉 다중-릴레이 무선 통신 시스템을 보인 것이다. 원천 노드 S 는 정보 신호를 $N-1$ 릴레이 단계를 거쳐 목적 노드 D 로 전달한다. 그림에서 $R_{n,j}$ 는 n 째 릴레이 단계의 j 째 릴레이를 가리키고 각 릴레이 단계에는 증폭-후-전달 릴레이가 L 개 있다고 가정한다 ($1 \leq j \leq L$). 시스템 내 모든 노드의 송신 전력은 P 로 잡음전력밀도는 N_0 로 동일하다. 한편, 릴레이 단계 사이의 거리가 멀어 두 단계 이상 떨어져 있는 릴레이 노드들 사이의 신호 영향은 없다고 가정한다. 그러면, 시스템 내 생성 가능한 링크는 $S \rightarrow R_{1,j}$, $R_{n-1,i} \rightarrow R_{n,j}$, $n=2,3,\dots,N-1$, $R_{N-1,i} \rightarrow D$ 가 된다.

각 링크 채널은 플랫 페이딩을 띄며 따라서 채널 응답은 복소 진폭 $h_{n(i,j)}$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서, $h_{1(1,j)}$ 는 $S \rightarrow R_{1,j}$ 의 채널 응답, $h_{n(i,j)}$ 는 $R_{n-1,i} \rightarrow R_{n,j}$ 의 채널 응답, $h_{N(i,1)}$ 는 $R_{N-1,i} \rightarrow D$ 의 채널 응답을 각

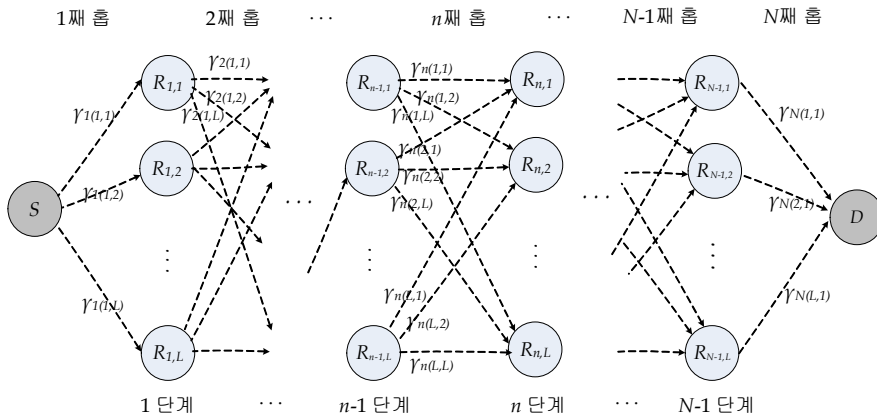


그림 1. N -홉 다중-릴레이 무선 통신 시스템

각 나타낸다. 각 링크 채널은 서로 독립이지만 홉마다 분포가 다른 나카가미- m_n 분포를 갖는다. 구체적으로 각 링크의 신호대잡음비 $\gamma_{n(i,j)} = Ph_{n(i,j)}^2/N_0$ 의 확률밀도함수는 다음과 같다^[10].

$$f_{\gamma_{n(i,j)}}(\gamma) = \frac{\gamma^{m_n-1}}{\Gamma(m_n)} \left(\frac{m_n}{\gamma}\right)^{m_n} \exp\left(-\frac{m_n}{\gamma}\right). \quad (1)$$

여기서, $\bar{\gamma}_n = E\{\gamma_{n(i,j)}\}$ 과 m_n 은 n 째 홉의 평균 신호대잡음비와 나카가미 파라미터를 각각 나타내고, $\Gamma(\cdot)$ 는 감마 함수이다^[11,8,310,1].

본 시스템에서는 홉마다 길이가 같은 시간 슬롯을 직교하게 할당하고 각 홉마다 선택된 하나의 릴레이가 신호를 전달한다. 따라서, 원천 노드에서 목적 노드까지의 신호 전달 경로는 길이가 $(N+1)$ 인 색인 벡터

$$\mathbf{a} = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_N] \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, $a_0 = 1$ 와 $a_N = 1$ 은 원천 노드와 목적 노드를 가리키고, a_n 은 $(1 \leq n \leq N-1)$ n 째 릴레이 단계에서 신호를 전송하는 릴레이 색인을 가리킨다. 그림 2는 원천 노드에서 목적 노드까지 신호 전달 경로 \mathbf{a} 를 보인 것으로, 해당 경로로 증폭-후-전달로 신호를 전송할 경우 경로 신호대잡음비는 다음과 같이 쓸 수 있다^[11].

$$\gamma_{e2e}(\mathbf{a}) = \frac{Ph_1^2 \prod_{n=2}^N |h_{n(a_{n-1}, a_n)}|^2 G_{n-1}^2}{\sum_{n=1}^N N_0 \left(\prod_{t=n+1}^N |h_{t(a_{t-1}, a_t)}|^2 G_{t-1}^2 \right)}. \quad (3)$$

여기서, G_{n-1} 은 n 째 홉에서 신호를 전달하는 $n-1$ 단계 릴레이의 신호 증폭 이득이다. 릴레이 노드의 전력 제한에 의해 신호 증폭 이득은 $G_{n-1} = \sqrt{P/(Ph_{n(a_{n-1}, a_n)}^2 + N_0)}$ 이며 그에 따라 식 (3)은 다음과 같이 주어진다.

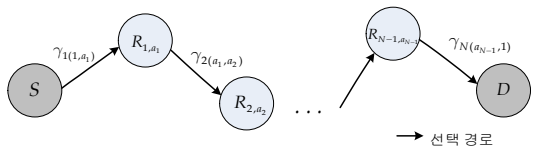


그림 2. 원천 노드에서 목적 노드까지의 경로.

$$\gamma_{e2e}(\mathbf{a}) = \frac{1}{\prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{1}{\gamma_{n(a_{n-1}, a_n)}}\right) - 1}. \quad (4)$$

최종 경로 선택 기법은 원천 노드에서 목적 노드까지 총 L^{N-1} 개의 가능 경로 가운데 경로 신호대잡음비를 최대로 하는 경로

$$\mathbf{a}^o = \arg \max_{\mathbf{a}} \gamma_{e2e}(\mathbf{a}) \quad (5)$$

를 선택하는 것이다. 최적 경로를 선택하는 방법은 모든 링크의 신호대잡음비를 알아야 하므로 채널상태정보 귀환 문제와 복잡도 문제가 발생한다. 이러한 문제를 줄이는 방법으로 애드-후 라우팅 기법 또는 그룹별 경로 선택 기법 등이^[9] 제안되었으나, 이들의 성능은 최적 경로 선택 기법보다 더 좋을 수 없다. 따라서, 최적 경로 선택 기법의 성능을 분석하면 고려한 시스템에서 제공 가능한 최대 성능을 예측할 수 있다.

III. 최적 경로 선택 기법의 성능 한계

본 절에서는 다중-홉 다중-릴레이 시스템에서 경로 선택 시 제공 가능한 최대 성능을 예측할 수 있도록 최적 경로 신호대잡음비의 상한과 그에 대한 적률생성함수를 유도한다.

최적 경로 선택 시의 경로 신호대잡음비는 식 (5)에서 볼 수 있듯이 모든 가능 경로의 신호대잡음비에 의존한다. 이 때 서로 다른 경로가 동일한 링크를 포함할 수 있기 때문에 모든 가능 경로의 신호대잡음비는 서로 독립이 아니다. 따라서, 최적 경로 신호대잡음비의 정확한 분포를 구하는 것은 매우 어려운 일이다. 이에 성능 분석이 용이하도록 본 논문에서는 최적 경로를 구성하는 n 째 가지 신호대잡음비를

$$\gamma_{n(a_{n-1}^o, a_n^o)} \leq z_n = \max_{1 \leq j \leq N} \gamma_{n(a_{n-1}^o, j)} \quad (6)$$

으로 대체하고, 부등식

$$\prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{1}{z_n}\right) \geq 1 + \sum_{n=1}^N \frac{1}{z_n} \quad (7)$$

를 이용하여 최적 경로 신호대잡음비의 상한을 다음과 같이 단순하게 한다.

$$\gamma_{e2e}(\mathbf{a}^o) \leq \frac{1}{\prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{1}{z_n}\right) - 1} \leq \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{z_n}\right)^{-1}. \quad (8)$$

그러면, 최적 경로 신호대잡음비의 상한은 서로 독립인 선택 가지 신호대잡음비 $\{z_n\}_{n=1}^N$ 의 조화 평균

$$\gamma_{e,ub} = \left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{z_n} \right)^{-1} \quad (9)$$

으로 얻을 수 있다. 그러나, 선택 가지 신호대잡음비 $\{z_n\}_{n=1}^N$ 의 분포는 식 (1)의 분포를 갖는 링크 신호대잡음비 $\gamma_{n(i,j)}$ 의 순서통계량으로 결정되고 이러한 분포를 갖는 확률 변수의 조화 평균에 대한 분포가 알려져 있지 않기 때문에 식 (9)를 바로 쓰는 것도 쉽지 않다.

이에 본 논문에서는 조화 평균과 기하 평균의 부등식

$$\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{z_n} \right)^{-1} \leq \left(\prod_{n=1}^N z_n \right)^{\frac{1}{N}} \quad (10)$$

를 이용하여 $\gamma_{e,ub}$ 의 상한 $\gamma_{e,ubl}$ 를 다음과 같이 얻는다.

$$\gamma_{e,ub} \leq \gamma_{e,ubl} = \frac{1}{N} \prod_{n=1}^N z_n. \quad (11)$$

그러면, $\{z_n\}_{n=1}^N$ 이 서로 독립이고 기댓값 함수의 특성으로 $\gamma_{e,ubl}$ 의 적률은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E[\gamma_{e,ubl}^k] = \left(\frac{1}{N} \right)^k E \left[\prod_{n=1}^N z_n^{\frac{k}{N}} \right] = \left(\frac{1}{N} \right)^k \prod_{n=1}^N E \left[z_n^{\frac{k}{N}} \right]. \quad (12)$$

즉, 상한 $\gamma_{e,ubl}$ 의 적률은 $\gamma_{e,ubl}$ 의 분포를 유도할 필요 없이 선택 가지 신호대잡음비 z_n 에 대한 분포만으로 계산할 수 있다. 따라서, 선택 가지 신호대잡음비 z_n 의 분포가 흠마다 달라도 쉽게 계산할 수 있다.

구체적으로 식 (6)으로 정의되는 선택 가지 신호대잡음비 z_n 은 순서 통계량에 의해 그 분포가 다음과 같다.

$$f_{z_n}(x) = L(1 - F_{\gamma_{n(i,j)}}(x))^{L-1} f_{\gamma_{n(i,j)}}(x) \quad (13)$$

여기서, $F_{\gamma_{n(i,j)}}(x)$ 는 $\gamma_{n(i,j)}$ 의 누적분포함수로 나카가미 파라미터 m_n 이 정수이면 다음과 같이 주어진다.

$$F_{\gamma_{n(i,j)}}(x) = e^{-(m_n/\bar{\gamma}_n)x} \sum_{i=0}^{m_n-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{m_n}{\bar{\gamma}_n} x \right)^i. \quad (14)$$

확률밀도함수는 식 (13)의 $(1 - F_{\gamma_{n(i,j)}}(x))^{L-1}$ 을 전개하여

$$f_{z_n}(x) = \frac{L}{\Gamma[m_n]} \left(\frac{m_n}{\bar{\gamma}_n} \right)^{m_n} e^{-(m_n/\bar{\gamma}_n)x} x^{m_n-1} \times \sum_{l=0}^{L-1} \binom{L-1}{l} (-1)^l e^{-(m_n l/\bar{\gamma}_n)x} \left\{ \sum_{i=0}^{m_n-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{m_n x}{\bar{\gamma}_n} \right)^i \right\}^l \quad (15)$$

으로 다시 쓸 수 있고, 여기에 등식

$$\left\{ \sum_{i=0}^{m_n-1} a_i y^i \right\}^l = \sum_{i=0}^{l(m_n-1)} \beta_i^l y^i \quad (16)$$

을 적용하면 최종적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_{z_n}(x) = \frac{L}{\Gamma[m_n]} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{l(m_n-1)} \binom{L-1}{l} (-1)^l \times \beta_i^l \exp\left(-\frac{m_n(l+1)x}{\bar{\gamma}_n}\right) \left(\frac{m_n}{\bar{\gamma}_n} \right)^{m_n+i} x^{m+i-1} \quad (17)$$

여기서, 계수 β_i^l 는 다음과 같은 반복 대입으로 얻는다.

$$\beta_0^l = 1, \beta_1^l = l, \beta_{l(m-1)}^l = \left\{ \frac{1}{(m-1)!} \right\}^l \quad (18)$$

$$\beta_i^l = \frac{1}{i} \prod_{j=1}^i \frac{j(l+1)-i}{j!} \beta_{i-j}^l \quad \text{for } 2 \leq i \leq l(m-1)-1$$

따라서, 적률을 얻는 데 필요한 $E[z_n^\epsilon]$ 은 닫힌 식

$$E[z_n^\epsilon] = \frac{L}{\Gamma[m_n]} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{l(m_n-1)} \binom{L-1}{l} (-1)^l \times \beta_i^l \left(\frac{m_n}{\bar{\gamma}_n} \right)^{m_n+i} \int_0^\infty x^{\epsilon+m_n+i-1} e^{-(m_n(l+1)/\bar{\gamma}_n)x} dx \quad (19)$$

$$= \left(\frac{\bar{\gamma}_n}{m_n} \right)^\epsilon \frac{L}{\Gamma[m_n]} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{l(m_n-1)} \binom{L-1}{l} \times \frac{(-1)^l}{(l+1)^{\epsilon+m_n+i}} \beta_i^l \Gamma[\epsilon+m_n+i]$$

으로 얻을 수 있고^[11; 3.381.4], 이로부터 경로 신호대잡음비 상한의 적률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[\gamma_{e,ubl}^k] = \left(\frac{1}{N} \right)^k \prod_{n=1}^N \left(\frac{\bar{\gamma}_n}{m_n} \right)^{k/N} \left\{ \frac{L}{\Gamma[m_n]} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{i=0}^{l(m_n-1)} \binom{L-1}{l} \times \frac{(-1)^l}{(l+1)^{m_n+i+k/N}} \beta_i^l \Gamma\left[m_n+i+\frac{k}{N}\right] \right\}^N \quad (20)$$

본 논문에서는 이렇게 얻은 경로 신호대잡음비의 적률을 이용하여 Padé 근사식으로^[12] 적률생성함수의 테일러 급수의 근사식을 다음과 같이 얻는다.

$$\phi_{\gamma_{e2c}}(s) \approx \phi_{\gamma_{e,ub1}}(s) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} E[\gamma_{e,ub1}^k] s^k \quad (21)$$

이렇게 얻은 적률생성함수는 다양한 변조 방식의 성능을 예측하는 데 활용할 수 있다. 예를 들어 MPSK의 평균 심볼 오류율은 적률생성함수를 써서 다음과 같이 얻을 수 있다^[13].

$$P_e = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi-\pi/M} \phi_{\gamma_{e2c}} \left(-\frac{\sin^2(\pi/M)}{\sin^2\theta} \right) d\theta \quad (22)$$

IV. 성능 평가

본 절에서는 QPSK 변조 방식을 적용할 때 최적 경로 선택 기법에 의한 심볼 오류율 성능을 III절에서 유도한 성능 한계와 모의실험으로 도출한다. 성능 비교를 위해 홉마다 채널 분포가 같을 때 기존의 연구에서 많이 적용하는 신호대잡음비의 최솟값을 이용한 분석을 부록에 제공하고 그에 따른 성능도 함께 도출하였다.

그림 3은 나카가미 파라미터가 $m_n = 1$ 인 레일리 페이딩 채널에서 $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_n$ 일 때 홉 수 N 에 따른 최적 경로 선택 기법의 심볼 오류율 성능을 보인다. 그림에서 릴레이 단계에서의 선택 가능한 릴레이 수는 $L=4$ 로 고정하였고, 모의실험 결과는 ‘Simul. Exact’ 제안한 분석 방법은 ‘Anal. GM’로 표시하였다. 성능 비교 결과 상기 파라미터에서는 기하 평균에 의한 성능 분석이 모의실험 결과를 잘 예측함을 볼 수 있다.

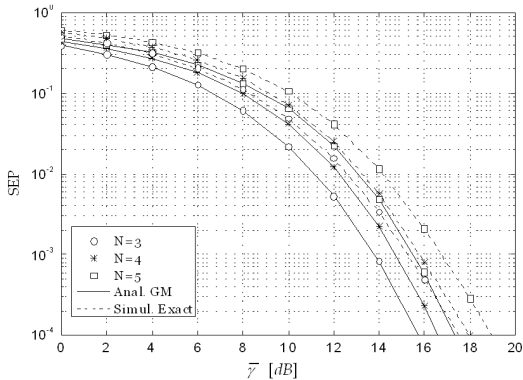


그림 3. 레일리 페이딩 채널에서 ($m_n = 1$) $L=4$ 일 때 홉 수 N 에 따른 심볼 오류율 성능.

또한 홉 수가 증가하면 각 릴레이에서 잡음이 증폭됨에 따라 심볼 오류율 성능이 조금씩 나빠지지만, 그 대신 신호 전달 거리가 N 배로 늘어나는 장점이 있다.

그림 4와 그림 5는 3-홉 다중-홉 시스템에서 나카가미 파라미터가 $m_n = 1$ 일 때와 $m_n = 3$ 일 때에 대해 각각 심볼 오류율 성능을 보인 것이다. 그림에서 모든 링크 채널의 분포를 동일하게 하고 ($\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_n$, $m = m_n$) 기존의 최솟값을 이용한 분석과 (‘Anal. Min.’ 논문에서 유도한 기하평균을 이용한 분석 (‘Anal. GM’) 결과를 릴레이 수 L 에 따라 비교하였다. 먼저 각 릴레이 단계마다 선택 후보 릴레이 수 L 이 증가하면 선택 다양성으로 최적 경로 선택 기법의 심볼 오류율 기울기가 가파르게 되면서 성능이 향상됨을 볼 수 있다. 그러나, 릴레이 단계의 선택 릴레이 수가 증가할수록 페이딩이 큰 레일리 페이딩에서 성능 향상이 크고 $m_n = 3$ 인 나카가미 페이딩 채널에서는 상

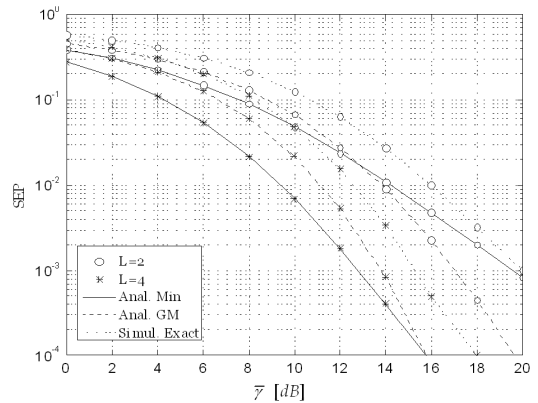


그림 4. 나카가미 파라미터가 $m_n = 1$ 인 레일리 채널에서 홉 수가 $N=3$ 일 때 릴레이 수 L 에 따른 심볼 오류율 성능.

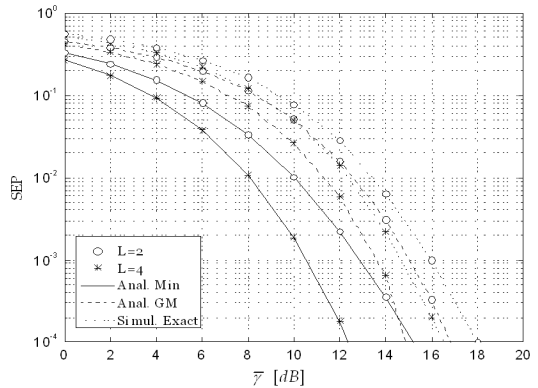


그림 5. 나카가미 파라미터가 $m_n = 3$ 인 페이딩 채널에서 $N=3$ 일 때 릴레이 수 L 에 따른 심볼 오류율 성능.

대적으로 성능 향상이 적음을 알 수 있다.

한편, 나카가미 파라미터가 클수록 페이딩이 줄어들기 때문에 그림 4보다 그림 5의 심볼 오류율 성능이 더 좋음을 볼 수 있다. 또한 그림에서 볼 수 있듯이 $m_n = 1$ 이고 $L = 2$ 인 경우를 제외하면 선택 가지 신호대잡음비의 최솟값보다는 기하 평균으로 성능을 분석하는 것이 실제 모의실험 결과에 더 근접함을 볼 수 있다. 그 이유는 릴레이 수가 많거나 나카가미 파라미터가 크면 선택 가지 신호대잡음비의 변화가 줄어들어 비슷한 값이 많이 나오고 이 경우 기하 평균과 조화 평균 값이 비슷해지기 때문이다. 한편, 시스템 파라미터에 상관없이 성능을 더 잘 예측하는 방법으로 선택 가지 신호대잡음비의 최솟값을 이용한 심볼 오류율과 기하 평균을 이용한 심볼 오류율을 모두 구하여 이 가운데 최대 심볼 오류율을 적용할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 다중-홉 다중-릴레이 무선 통신 시스템에서 최적 경로를 선택할 때 증폭-후-전달 릴레이로 얻을 수 있는 최대 성능의 한계를 유도하였다. 이때 채널 모형은 각 링크마다 독립이나 홉마다 분포가 다른 일반화된 나카가미 페이딩을 고려하였다. 이러한 조건 하에 최적 경로를 구성하는 선택 가지들의 신호대잡음비에 대한 기하 평균 상한을 이용하여 경로 신호대잡음비의 적률값과 그에 따른 심볼오류율을 도출하였다. 그 결과 기하 평균에 의한 성능 한계는 선택 다양성이 커지거나 나카가미 파라미터가 클 때 실제 성능을 더 잘 예측함을 볼 수 있었다. 또한, 홉 수를 늘리면 성능 저하가 조금 발생하지만 거리를 홉 수만큼 넓힐 수 있고 페이딩이 큰 채널에서는 선택 가능한 릴레이 수를 증가시켜 성능을 크게 개선할 수 있음을 보였다.

부 록: 최소 가지 신호대잡음비 근사화

링크 신호대잡음비의 분포가 모두 같으면($m_1 = m_2 = \dots = m_N$, $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \dots = \bar{\gamma}_N$), 선택 가지 신호대잡음비 $\{z_n\}_{n=1}^N$ 또한 그 분포가 $f_z(x) = f_{z_n}(x)$ 으로 모두 같아진다. 이 경우 선택 가지 신호대잡음비의 최솟값으로 경로 신호대잡음비를 비교적 쉽게 분석할 수 있다. 즉, 부등식

$$\sum_{n=1}^N \frac{1}{z_n} \geq \max_{1 \leq n \leq N} \frac{1}{z_n} \quad (23)$$

에 의해 경로 신호대잡음비의 또 다른 상한을 다음과 같이 얻는다.

$$\left(\sum_{n=1}^N \frac{1}{z_n} \right)^{-1} \leq \gamma_{e,ub2} = \min_{1 \leq n \leq N} z_n \quad (24)$$

이 때, 상한 $\gamma_{e,ub2}$ 의 확률밀도함수는 순서 통계량에 의해

$$f_{\gamma_{e,ub2}}(x) = N[1 - F_z(x)]^{N-1} f_z(x) \quad (25)$$

으로 주어지고, 식 (25)에서 $[1 - F_z(x)]^{N-1}$ 를 다시 전개하면 최종 확률밀도함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$f_{\gamma_{e,ub2}}(x) = \frac{NL}{\Gamma[m]} \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N-1}{n} (-1)^n \times \sum_{l=0}^{L(n+1)-1} \binom{L(n+1)-1}{l} \times (-1)^l \times \sum_{i=0}^{l(m-1)} \beta_i^l \exp\left(-\frac{m(l+1)x}{\bar{\gamma}}\right) \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^{m+i} x^{m+i-1} \quad (26)$$

이로부터 경로 신호대잡음비의 상한에 대한 적률은

$$E\langle \gamma_{\gamma_{\min}}^k \rangle = \left(\frac{\bar{\gamma}}{m}\right)^k \frac{NL}{\Gamma[m]} \sum_{n=0}^{N-1} \binom{N-1}{n} (-1)^n \times \sum_{l=0}^{L(n+1)-1} \binom{L(n+1)-1}{l} (-1)^l \sum_{i=0}^{l(m-1)} \beta_i^l \frac{\Gamma(k+i+m)}{(l+1)^{k+i+m}} \quad (27)$$

으로 얻을 수 있고, 이를 이용하여 III절과 동일한 방법으로 적률생성함수를 얻으면 심볼 오류율을 계산할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M.O. Hasna and M.-S. Alouini, "Outage probability of multihop transmission over Nakagami fading channels," *IEEE Commun. Lett.*, Vol.7, No.5, pp.216-218, May 2003.
- [2] J.N. Laneman and G.W. Wornell, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.49, No.10, pp.2415-2425, Oct. 2003.
- [3] J.N. Laneman, D. N. C. Tse, and G.W. Wornell,

“Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.50, No.12, pp.3062-3080, Dec. 2004.

[4] L. Yang, M. O. Hasna, and M.-S. Alouini, “Average outage duration of multihop communication systems with regenerative relays,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.4, No.4, pp.1366-1371, July 2005.

[5] G.K. Karagiannidis, T.A. Tsiftsis, and R.K. Mallik, “Bounds for multihop relayed communications in Nakagami-m Fading,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol.54, No.1, pp.18-22, Jan. 2006.

[6] G. K. Karagiannidis, “Performance bounds of multihop wireless communications with blind relays over generalized fading channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.5, No.3, pp.498-503, Mar. 2006.

[7] A. Beltsas, 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.3, pp.659-672, Mar. 2006.

[8] D.S. Michalopoulos and G.K. Karagiannidis, “Performance analysis of single relay selection in Rayleigh fading,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.7, No.10, pp.3718-3724, Oct. 2008.

[9] B.Gui, L. Dai, and A. Cimini, “Routing strategies in multihop cooperative networks,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol.8, No.2, Feb. 2009.

[10] M.K. Simon and M.S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels, 2nd Ed.* New York: Wiley, 2005.

[11] I.S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products, 6th Ed.*, Academic, NY, 2000.

[12] G.A. Baker and P. Graves-Morris, *Padé Approximants*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1996.

[13] G.K. Karagiannidis, “Moments-based approach to the performance analysis of equal-gain diversity in Nakagami-m fading,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol.52, No.5, pp.685-690, May 2004.

카몰 알무라도프 (Kamol Almuradov)

준회원



2005년 6월 타슈켄트 정보기술 대학교 통신공학과 공학사
 2010년 2월 경희대학교 전자전 파공학과 공학석사
 2010년 3월~현재 우즈베키스탄 전자기 호환성 센터(CEMC) <관심분야> 협력 무선통신, 릴레이 시스템

박진배 (Jin Bae Park)

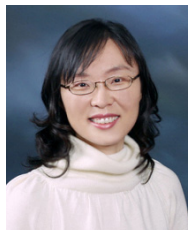
학생회원



2005년 3월~현재 경희대학교 전자공학과 학부과정
 <관심분야> 이동/무선 통신, 통신 이론

김윤희 (Yun Hee Kim)

종신회원



1995년 2월 한국과학기술원 전 기밀전자공학과 공학사
 1997년 2월 한국과학기술원 전 기밀전자공학과 공학석사
 2000년 1월~2000년 4월 UCSD 방문 연구원
 2000년 8월 한국과학기술원 전자산학과 박사
 2000년 9월~2004년 8월 한국전자통신연구원 선임 연구원
 2004년 9월~현재 경희대학교 전자정보학부 조교수, 부교수
 2006년 1월~현재 IEEE 준석학회원, 한국통신학회 논문지 편집위원
 <관심분야> 이동/무선 통신, 통신이론, 통계학적 신호처리, 부호이론