

http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.4.193

JIIBC 2013-4-25

페이딩 채널에서 최선 릴레이 선택을 갖는 네트워크 코딩의 성능

Performance of Network Coding with Best Relay Selection in Fading Channels

김남수*

Nam-Soo Kim

요 약 최근 이동통신 뿐 만 아니라 TV방송 등에서도 릴레이를 이용한 양방향 무선채널의 전송효율을 높이기 위한 네트워크 코딩에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 동시에 여러 개의 릴레이가 전송하는 대신 최선의 릴레이를 이용하여 양방향 데이터를 전송하는 네트워크 코딩 시스템의 평균 전송용량 및 오수신율을 유도하였다. 일반적으로 양방향 통신 시스템의 경우 순방향 및 역방향 링크의 데이터 비대칭성이 존재하므로, 데이터 대칭 링크와 비대칭 링크도 포함하여 성능을 유도하였다. 유도한 결과 병렬 릴레이의 수가 증가할수록 공간 다이버시티에 의한 신호 대 잡음비(SNR) 이득이 증가함을 알 수 있었고, 대칭 링크의 경우 주어진 조건하에서 단일 릴레이를 사용하였을 때보다 9개의 릴레이가 존재하는 경우 11.4 dB의 SNR 이득을 얻을 수 있었다. 또한 비대칭 링크의 경우, 오수신율은 데이터 비대칭성보다는 릴레이의 수에 민감하다는 결과를 얻었다.

Abstract Recently, network coding has been actively studied to increase the spectral efficiency of two-way relay wireless channels such as cellular systems as well as broadcasting systems. In this paper, we derive the average transmission capacity and the outage probability of a network coding system, which utilizes two-way data transmission via the best relay rather than multiple relays. Since the data unbalance between the forward and the reverse link in two-way communication systems exists, we include the asymmetric link as well as the symmetric link in the analysis. It is noticed that the space diversity gain increases as the increase of the number of relays. Also we obtain 11.4 dB signal-to-noise ratio (SNR) gain with 9 relays compared to that with single relay in symmetrical link at the given conditions. In asymmetrical links, we denotes that the outage probability is more sensitive to the number of relays rather than data unbalance between the links.

Key Words : Network coding, Relay, Fading channel.

1. 서 론

최근 2000년에 R. Ahlswede 등[1]이 컴퓨터 네트워크에서 데이터 전송을 응용하여 제안한 네트워크 코딩은

양 방향 데이터 전송 시 채널용량을 증가시킬 수 있는 방법으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 에러 제어 코딩은 송신-수신의 단말에서 부호화 및 복호화를 하는데, 네트워크 코딩은 송신-릴레이-수신 경로 중간에

*정회원, 청주대학교 전자공학과

접수일자 : 2013년 6월 7일, 수정완료 : 2013년 7월 16일

게재확정일자 : 2013년 8월 16일

Received: 7 June, 2013 / Revised: 16 July, 2013

Accepted: 16 August, 2013

*Corresponding Author: nskim@cju.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Cheongju University, Korea

위치한 릴레이가 두 개의 소스로부터 받은 데이터를 서로 배타적 결합하여 각각의 소스로 송신하게 된다. 릴레이로부터 수신한 각각 소스는 자신이 보낸 데이터를 가지고 있으므로, 릴레이로부터 수신한 데이터에 자신의 데이터를 배타적 결합하면 결국 상대 소스로부터 데이터를 수신하게 되는 구조이다. 이와 같은 구조 때문에 일반적으로 릴레이를 사용하는 반이중(Half duplex) 통신방식에 비해서 데이터 전송 효율이 약 25% 증가하게 된다.

한편 이동무선 채널로 데이터를 전송할 때, 수신된 신호는 페이딩을 받아서 수신신호 크기가 일정하지 않고 계속 변한다. 따라서 공간적으로 다이버시티를 이용하기 위하여 송신기와 수신기 사이에 여러 개의 릴레이를 사용하기 시작하였는데, 초기에 여러 개의 릴레이를 사용하면 시스템의 성능은 향상시킬 수 있었지만 여러 개의 직교 통신 채널(예를 들어 여러 개의 주파수, 타임슬롯, 코드 등)을 필요로 하는 단점이 있었다. 따라서 최근에는 여러 개의 릴레이를 사용하는 대신 데이터를 전송하기 전에 여러 개의 릴레이 중 가장 적합한 릴레이 하나를 선택한 후, 선택된 릴레이만 전송하는 방법을 사용하므로써 통신 자원을 절약함과 동시에 다이버시티 이득과 인접 시스템에 동일 채널 간섭 등을 줄이는 효과를 얻고 있다[2],[3],[4].

2009년 Ding은 다중 릴레이를 사용하는 통신 시스템에서, 여러 개의 릴레이 중 물리계층과 맥(MAC)계층을 이용하여 최적의 릴레이를 선택하는 S. Zhu등이 제안한 방법[5]을 네트워크 코딩에 적용하였다[6]. 이 방법은 첫째, MAC 계층에서 다른 릴레이가 전송 중 인지를 확인(Carrier sensing)하고, 둘째로 물리계층에서 소스-릴레이-목적지 사이의 비트오율이 낮은 링크를 선정한다. 이 두 단계를 거쳐서 최적의 릴레이를 선택하게 된다. S. Zhu의 방법은 물리계층에서만 보면 소스-목적지-릴레이 경로 중 신호 대 잡음비(SNR)이 가장 좋은 릴레이를 선택하는 방법과 동일하다[2].

한편 여러 개의 소스-릴레이-목적지 경로 중 병목현상(Bottleneck)을 최소화하여 데이터의 전송을 최대로 하는 최적의 릴레이를 선택하는 방법이 있다[7]. 최근 K. Tourki등이 복조 후 전송 릴레이를 사용하였을 경우 소스-최적의 릴레이-목적지 경로의 정확한 오수신율을 유도하였다[8].

또한 방송 및 이동통신과 같은 양방향 통신 시스템에서는 소스1-릴레이-소스2 경로와 소스2-릴레이-소스1

경로의 데이터 전송량이 서로 상이한 경우가 대부분이다. 최근 Y. Li 등[9]과 Q.You 등[10]은 네트워크 코딩 시스템에서 참고문헌 [7]의 릴레이를 선택하였을 때 비트오율을 유도하였다. 그러나 채널 전송 스펙트럼 효율에 관하여 고려하지 않았으며, 특히 데이터 전송속도가 동일한 대칭 링크에 대해서만 고려하였다.

따라서 본 논문에서는 여러 개의 병렬 릴레이를 사용하는 네트워크 코딩 시스템에서, 하나의 최적의 릴레이를 선택하였을 때 데이터 대칭 링크와 비대칭 링크에서 평균 스펙트럼 효율을 릴레이 수의 함수로 유도하였다. 또한 평균 오수신율을 유도하였고, 유도한 결과를 이용하여 오수신율에 미치는 영향을 분석함으로써 오수신율에 가장 영향을 미치는 파라미터에 관하여 분석하였다.

본 논문의 구성은 제2장에서 고려하고자하는 네트워크 시스템 모델에 관하여 서술하였고, 최선의 릴레이 선정방법을 언급하였다. 제3장에서는 평균 데이터 속도 및 오수신율을 유도하였고, 제4장에서 데이터 대칭 링크 및 비대칭 링크에 관하여 서술하였다. 그리고 제5장에서는 구체적인 수치해석의 예 및 결과에 대한 고찰을 하였다. 끝으로 제6장에서 결론과 향후 연구방향에 관하여 서술하였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 이 논문에서 고려하고자하는 여러 개의 릴레이를 가진 네트워크 코딩 시스템 모델이다.

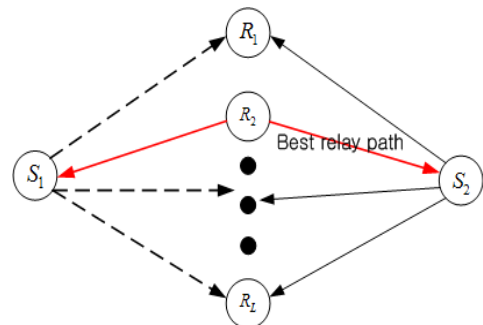


그림 1. 네트워크 코딩 시스템 모델
Fig. 1. Network coding system model

무선 전송 채널은 일반적으로 가정하는 직접과가 존재하지 않고 간접과만 존재하는 레일레이 페이딩 채널이

라고 가정한다. 그리고 시간 선택적 페이딩으로 블록페이딩을 가정한다. 블록페이딩은 가장 좋은 릴레이를 선택하기위한 타임 슬롯과 데이터를 전송하는 채널의 상태가 동일하고, 다음 슬롯에서는 동일하지 않은 채널을 의미한다. 그림1의 시스템 모델을 이용하여 데이터를 전송하기 위해서는 2 가지의 단계가 있는데, 첫 번째 릴레이 선택단계, 둘째 데이터 전송 단계이다.

먼저 릴레이 선택단계를 설명하자. 본 논문에서 릴레이는 복조후 전송(Decode-and-forward) 릴레이를 가정한다. 가장 적합한 릴레이를 선택하는 방법으로는 여러가지가 있는데, 그 중 대표적인 방법으로 소스1-릴레이-소스2 경로의 SNR이 가장 좋은 릴레이를 선택하는 방법과 데이터를 전송하기 위해서 병목현상이 가장 적은 릴레이를 선택하는 방법이 있다[8]. 첫 번째 방법인 전 경로에 걸쳐서 SNR이 가장 좋은 릴레이를 선택하는 방법은 통계적 순서화 (Order statistic)를 이용하여 각 경로의 SNR을 순서대로 나열 한 후 릴레이를 선택하는 방법이며, 두 번째 방법은 먼저 정해진 i 번째 경로, 즉 소스1- i 번째 릴레이-소스2 ($S_1 - R_i - S_2, i = 1, 2, \dots, L$) 경로에 대해서 소스1- i 번째 릴레이 ($S_1 - R_i$) 와 i 번째 릴레이-소스2 ($R_i - S_2$) 중 SNR 중 작은 경로를 선택한 후, i 를 1에서 L 까지 작은 SNR을 갖는 경로를 선택한다. 그 후 L 개의 SNR이 작은 경로 중 가장 큰 SNR을 갖는 경로를 선택하면 결국 병목현상이 가장 적은 릴레이를 선택하게 된다. 이 때 선택된 릴레이를 r^* 라고하면, 선택 규칙을 다음과 같이 쓸 수 있다 [7].

$$r^* = \arg \max_{i \in \{1, 2, \dots, L\}} \min(\gamma_{r_i S_1}, \gamma_{r_i S_2}) \quad (1)$$

여기서 $\gamma_{r_i S_1}$ 과 $\gamma_{r_i S_2}$ 은 각각 i 번째 릴레이 r_i 와 1번 소스 S_1 경로의 수신 SNR, 그리고 i 번째 릴레이 r_i 와 2번 소스 S_2 경로의 수신 SNR이다. 그림1의 실선은 선택된 릴레이의 경로를 나타낸다. 다음으로 데이터 전송단계는 다음과 같이 세 개의 타임슬롯으로 나뉜다. 첫 번째 타임슬롯에서는 소스1이 데이터를 전송하고 모든 릴레이가 수신한다. 두 번째 타임슬롯에서는 소스2가 전송하고 모든 릴레이가 수신한다. 세 번째 타임슬롯에서는 선택된 릴레이가 소스1과 소스2로부터 수신한 데이터를 배타적

결합(ExOR)한 데이터를 소스1과 소스2로 동시에 전송한다. 세 번째 타임슬롯에서는 릴레이가 소스1과 소스2로 동시에 전송하므로 방송단계라고하자. 앞에서 블록페이딩을 가정한 바와 같이, 릴레이 선택 단계의 채널 상태와 데이터 전송단계의 세 번째 타임슬롯에서 릴레이가 데이터를 전송할 때의 채널 상태는 동일하다고 가정한다.

III. 평균 데이터 속도 및 오수신율

이 장에서는 네트워크 코딩 시스템에서 선택된 릴레이를 사용하였을 때 오수신율과 평균 데이터 전송 속도에 관하여 서술하자.

1. 선택된 릴레이의 오수신율

주어진 채널을 통하여 데이터를 전송할 때, 최대 데이터 전송속도는 대역폭과 수신 SNR의 함수가 되며 세논의 최대 전송용량(또는 전송속도) C [bit/sec]로 주어진다.

$$C = B \log_2(1 + \gamma) \quad (2)$$

여기서 B 는 대역폭이고, γ 는 채널을 통하여 수신된 SNR이다. 특히 무선채널에서는 페이딩에 의한 영향으로 수신된 SNR이 일정하지 않고 계속하여 변동된다. 무선채널을 레일레이 페이딩이라고 가정하면 수신된 SNR의 변화는 다음과 같은 확률밀도함수를 갖는다.

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} e^{-\gamma/\bar{\gamma}} \quad (3)$$

여기서 $\bar{\gamma}$ 는 평균 SNR을 나타낸다. 식(2)에서 송신 데이터의 속도가 R 로 고정되어 있을 경우, 데이터 전송속도 R 을 유지하기 위한 수신된 SNR의 임계값을 Γ 라고 하면, $\Gamma = 2^{R/B} - 1$ 이 되며, 수신된 SNR이 Γ 보다 작으면 데이터 전송속도 R 을 유지할 수 없어서 수신에러가 발생하고, 반대로 크면 에러없이 수신한다고 정의하자. 이 때 에러가 발생할 확률을 오수신율이라고 하면 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_e = \Pr(\gamma < \Gamma) = \int_0^\Gamma f_\gamma(\gamma) d\gamma = 1 - e^{-\Gamma/\bar{\gamma}} \quad (4)$$

그런데 그림1에 나타난 바 와 같이, 식(1)에 의해서 선택된 릴레이와 소스1 및 소스2간의 오수신율은 레일레이 페이딩 환경에서 데이터를 전송하였을 때, 두 지점간의 오수신율인 식(4)를 직접 적용할 수 없다. 즉 소스1-선택된 릴레이 경로와 소스2-선택된 릴레이 경로 사이는 서로 독립하지 않으므로 소스1-선택된 릴레이 사이의 오수신율과 소스2-선택된 릴레이 사이의 오수신율은 각각 선택된 릴레이가 주어졌다는 가정 하에서 조건부 확률을 구한 후 오수신율을 구해야 한다. 따라서 소스1-선택된 릴레이 경로의 확률밀도함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p_{S_1r^*}(x) = \int_0^{\infty} p_{S_1r^*|Z_i=z(x)} p_{\max(Z_i)}(z) dz \quad (5)$$

여기서 $Z_i = \min(\gamma_{S_1r^*}, \gamma_{r^*S_2})$ 이다. 마찬가지로 선택 릴레이-소스2 경로의 확률밀도함수도 식(5)에 $p_{S_1r^*}$ 대신에 $p_{r^*S_2}$ 를 대입하면 구할 수 있다. 식(5)의 조건부 확률 밀도함수는 베이스(Bayes)의 규칙을 적용하면,

$$p_{S_1r^*|Z_i=z(x)} = \frac{p_{S_1r^*, Z_i=z(x)}}{p_{Z_i}(z)} \quad (6)$$

으로 쓸 수 있다. 그리고 $p_{Z_i}(z)$ 는 소스1-선택릴레이, 선택릴레이-소스2 경로의 확률밀도함수이고, 누적분포함수(cdf)는 레일레이 페이딩 채널에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{Z_i}(z) = \int_0^z p_{Z_i}(x)dx = 1 - \Pr(\gamma_{S_1r^*} > z) \Pr(\gamma_{r^*S_2} > z) \quad (7)$$

$$= 1 - e^{-z/\bar{\gamma}}$$

여기서 $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_{S_1r^*} \bar{\gamma}_{r^*S_2} / (\bar{\gamma}_{S_1r^*} + \bar{\gamma}_{r^*S_2})$ 이다. 다행히 Alouini등은 식(5)를 유도하여 소스1-선택된 릴레이 경로와 소스2-선택된 릴레이 경로의 오수신율을 다음과 같이 유도하였다[8]. 따라서 소스1-선택된 릴레이 경로의 오수신율을 P_{01} 이라고 하면,

$$P_{01} = \Pr[\gamma_{S_1r^*} < \Gamma] = F_{\gamma_{S_1r^*}}(\Gamma)$$

$$= \sum_{i=1}^L \binom{L}{i} \frac{(-1)^{i-1}}{\bar{\gamma}_{r^*S_2}} \frac{i\bar{\gamma}}{i\bar{\gamma}_{r^*S_2} - \bar{\gamma}}$$

$$\times \left\{ \bar{\gamma}_{r^*S_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Gamma}{\bar{\gamma}_{r^*S_1}}\right) \right) - \frac{\bar{\gamma}}{i} \left(1 - \exp\left(-\frac{i\Gamma}{\bar{\gamma}}\right) \right) \right\} \quad (8)$$

$$+ \sum_{i=1}^L \binom{L}{i} \frac{(-1)^{i-1}}{\bar{\gamma}_{r^*S_1}} \frac{\bar{\gamma}}{i} \left(1 - \exp\left(-\frac{i\Gamma}{\bar{\gamma}}\right) \right)$$

이 되고, 여기서 $\bar{\gamma}_{S_1r^*}$ 와 $\bar{\gamma}_{r^*S_2}$ 는 각각 소스1-선택된 릴레이 경로 및 선택된 릴레이-소스2 경로의 평균 SNR이고, $\bar{\gamma} = \gamma_{S_1r^*} \gamma_{r^*S_2} / (\gamma_{S_1r^*} + \gamma_{r^*S_2})$ 이다. 선택된 릴레이-소스2 경로의 오수신율을 P_{02} 라고 하면,

$$P_{02} = \Pr[\gamma_{r^*S_2} < \Gamma] = F_{\gamma_{r^*S_2}}(\Gamma)$$

$$= \sum_{i=1}^L \binom{L}{i} \frac{(-1)^{i-1}}{\bar{\gamma}_{S_1r^*}} \frac{i\bar{\gamma}}{i\bar{\gamma}_{S_1r^*} - \bar{\gamma}}$$

$$\times \left\{ \bar{\gamma}_{r^*S_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Gamma}{\bar{\gamma}_{r^*S_2}}\right) \right) - \frac{\bar{\gamma}}{i} \left(1 - \exp\left(-\frac{i\Gamma}{\bar{\gamma}}\right) \right) \right\} \quad (9)$$

$$+ \sum_{i=1}^L \binom{L}{i} \frac{(-1)^{i-1}}{\bar{\gamma}_{r^*S_2}} \frac{\bar{\gamma}}{i} \left(1 - \exp\left(-\frac{i\Gamma}{\bar{\gamma}}\right) \right)$$

으로 주어진다.

네트워크 코딩 시스템에서 세 번째 타임슬롯인 방송 단계의 평균 오수신율을 네트워크의 오수신율이라고 정의하면, 네트워크의 평균 오수신율은 소스1-선택된 릴레이 경로의 오수신율 P_{01} 과 선택된 릴레이-소스2 경로의 오수신율 P_{02} 의 평균으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \frac{P_{01} + P_{02}}{2} \quad (10)$$

2. 평균 데이터 속도

이 절에서는 그림1의 네트워크 코딩 시스템에서 데이터 전송속도를 고려하자. 첫 번째 타임슬롯에서 소스1이 데이터를 전송하고 선택된 릴레이가 수신하는 경우의 전송속도는 식(2)의 γ 대신 소스1과 선택된 릴레이 사이의 SNR, $\gamma_{S_1r^*}$,를 대입하면 얻을 수 있다. 그리고 두 번째 타임슬롯에서는 소스2가 데이터를 전송하고 선택된 릴레이가 수신하는 경우이며, 이 경우 전송속도는 식(2)의 γ 대신 소스2와 선택된 릴레이 사이의 SNR $\gamma_{S_2r^*}$ 를 대입하면 얻을 수 있다.

또한 세 번째 타임슬롯인 방송단계에서는 선택된 릴레이가 소스1과 소스2로 배타적 결합된 데이터를 전송하므로, 다음과 같은 경우를 모두 고려하여 전송속도를 계산하여야 한다[11]:

- 1) 소스1과 소스2가 모두 데이터를 에러없이 수신한 경우
- 2) 소스1만 데이터를 에러없이 수신한 경우

- 3) 소스2만 데이터를 에러없이 수신한 경우
- 4) 소스1 및 소스2 모두 에러없이 데이터를 수신하지 못한 경우이다.

IV. 대칭 및 비대칭 링크의 전송속도 및 오수신율

일반적인 방송 및 이동통신 시스템에서는 순방향 및 역방향의 데이터 속도가 상이하다. 즉 양방향 방송 시스템의 경우 송신기에서 수신기로 전송하는 데이터의 속도가 수신기에서 송신기로 전송하는 속도가 낮고, 이동통신 시스템의 경우도 마찬가지로 기지국에서 이동국으로 전송하는 경우 역인 경우보다 데이터 전송속도가 일반적으로 빠르다. 따라서 이 장에서는 데이터 전송속도가 동일한 대칭링크인 경우와 데이터 전송속도가 상이한 비대칭 링크의 경우 각각의 평균 데이터 전송 속도와 오수신율을 유도하자.

1. 데이터 대칭 링크

데이터 대칭 링크는 소스1-선택 릴레이-소스2와 소스2-선택 릴레이-소스1의 순방향 및 역방향의 데이터 전송속도가 R 로 동일한 경우이다. 이 경우 무선 채널의 영향을 받지 않는다고 가정하면, 3.2절에서 언급한 데이터 전송속도는 1)의 경우 $2R$, 2)의 경우 R , 3)의 경우 R , 4)의 경우 0이다. 그런데 선택된 릴레이가 각각의 무선경로(선택된 릴레이-소스1 경로 및 선택된 릴레이-소스2 경로)를 통하여 정보를 전송할 때 페이딩을 받으므로 평균 전송속도를 구해야 한다.

따라서 3.2절과 같은 4가지 경우, 선택된 릴레이가 전송하는 방송단계에서 데이터 대칭링크의 평균 전송속도 $\langle R \rangle_{sym}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다[12],

$$\langle R \rangle_{sym} = 2R(1-P_{01})(1-P_{02}) + R(1-P_{01})P_{02} + RP_{01}(1-P_{02}) \quad (11)$$

그러므로 식(10)에 식(8)와 식(9)을 대입하면 평균 전송속도를 구할 수 있다. 만일 무선채널에서 에러가 발생하지 않으면 P_{01} 과 P_{02} 는 영이 되고, 평균 전송속도는 최대 전송속도 $2R$ 이 된다.

그리고 소스1과 선택된 릴레이 사이의 평균 SNR 그리고 소스2와 선택된 릴레이 사이의 평균 SNR이 동일하다고 가정하면, 데이터 대칭링크인 경우에는 네트워크의 평균 오수신율은 소스1-선택 릴레이 채널과 선택릴레이-소스2 채널의 오수신율이 동일하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = P_{01} = P_{02} \quad (12)$$

2. 데이터 비대칭 링크

데이터 전송속도가 서로 다른 데이터 비대칭 링크의 경우에는 네트워크의 오수신율이 대칭링크의 경우와 다르다. 따라서 이 경우에는 3.2에서 언급한 4가지 경우의 데이터 전송속도가 다르다. 먼저 소스1과 소스2의 전송속도를 각각 R_1 및 R_2 라고하자. 먼저 무선 채널의 영향을 받지 않는다고 가정하면, 데이터 전송속도는 1)의 경우 $R_1 + R_2$, 2)의 경우 R_2 , 3)의 경우 R_1 , 4)의 경우 0 이다.

따라서 위와 같은 4가지 경우, 방송단계에서 데이터 비대칭 링크의 평균 전송속도 $\langle R \rangle_{asym}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\langle R \rangle_{asym} = R_1(1-P_{01})(1-P_{02}) + R_2(1-P_{01})(1-P_{02}) + R_2(1-P_{01})P_{02} + R_1P_{01}(1-P_{02}) \quad (13)$$

여기서 첫 번째 항 및 두 번째 항은 각각 소스1이 에러없이 수신한 경우와 소스2가 에러없이 수신한 경우이다. 그리고 세 번째 및 네 번째 항은 각각 소스1만 에러없이 수신한 경우 및 소스2만 에러없이 수신한 경우이다. 여기서 P_{01} 과 P_{02} 는 각각 식(8)의 소스1-선택 릴레이 경로의 오수신율 및 식(9)의 선택된 릴레이-소스2 경로의 오수신율 식과 동일하지만, 수신된 SNR의 임계값은 서로 상이하며 각각 $\Gamma_{01} = 2^{R_1/B} - 1$ 및 $\Gamma_{02} = 2^{R_2/B} - 1$ 가 된다.

그리고 데이터 비대칭 링크의 평균 오수신율은 P_{01} 과 P_{02} 을 구한 식(8) 및 식(9)에 Γ 대신 각각 $\Gamma_{01} = 2^{R_1/B} - 1$ 및 $\Gamma_{02} = 2^{R_2/B} - 1$ 를 대입한 후, 식(10)으로 부터 구할 수 있다.

V. 수치해석의 예 및 결과고찰

그림 2는 소스1과 선택된 릴레이 사이의 평균 SNR, 그리고 소스2와 선택된 릴레이 사이의 평균 SNR이 동일하다고 가정할 때, 데이터 대칭링크에서 릴레이의 수에 따른 데이터 전송속도를 대역폭으로 나눈 평균 스펙트럼 효율($\langle R/B \rangle$ [bps/Hz])을 나타낸 그림이다(만일 $B=1$ 로 놓으면, $\langle R/B \rangle$ 는 평균 채널속도, 즉 평균 채널용량이 된다).

먼저 릴레이의 수가 1개인 네트워크 코딩의 경우 SNR이 약 35 dB가 되어야 최대 스펙트럼 효율 $2R/B$ 에 도달한다. 이 논문에서 가정한 시스템 모델과 같이 릴레이가 여러 개인 경우, 식(2)에 의한 릴레이 선택 효과는 평균 스펙트럼 효율의 95%인 1.9 [bps/Hz]를 기준으로 할 때, $L=3, 5, 7, 9$ 로 증가함에 따라서 각각 7.8 dB, 9.8 dB, 10.9 dB, 11.6 dB의 SNR 이득을 얻었다. 비록 릴레이가 증가함에 따라서 공간 다이버시티에 의한 SNR 이득은 감소하지만, 하나의 릴레이를 사용하였을 때보다 현저한 성능 개선을 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

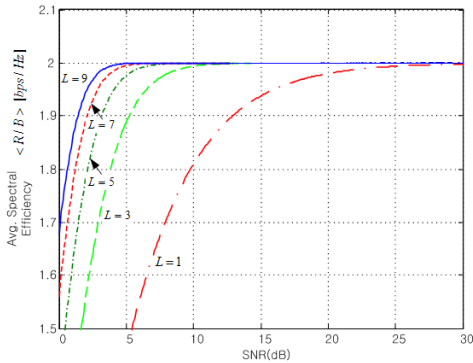


그림 2. 대칭링크에서 릴레이의 수에 따른 채널의 평균 스펙트럼 효율 ($R/B = 1$ [bps/Hz], $\bar{\gamma}_{S_1 r^*} = \bar{\gamma}_{r^* S_2}$)
 Fig. 2. Average spectral efficiency for different number of relays in symmetric link ($R/B = 1$ [bps/Hz], $\bar{\gamma}_{S_1 r^*} = \bar{\gamma}_{r^* S_2}$)

그림 3은 데이터 대칭채널에서 스펙트럼 효율 R/B [bps/Hz]의 변화에 따른 평균 스펙트럼 효율 $\langle R/B \rangle$ 를 나타낸 것이다. 스펙트럼 효율이 높을수록 최대 스펙트럼 효율에 도달하는데 필요한 SNR이 높아짐을 알 수 있

다. 스펙트럼 효율이 높다는 것은 정해진 대역폭으로 더 빠른 데이터를 전송하는 것이고, 더 빠른 데이터를 전송하려면 식(2)에 의하여 SNR이 높아져야 함을 나타낸 것이다.

그림4는 데이터 대칭링크에서 선택된 릴레이가 전송하는 방송단계에서 소스1 또는 소스2가 수신한 오수신율을 스펙트럼 효율의 변화에 따라서 그린 것이다. 그림3에서 유추하였듯이 스펙트럼 효율이 높을수록 그리고 릴레이의 수가 적을수록 에러가 더 많이 발생함을 알 수 있다. 즉 릴레이가 증가할수록 공간 다이버시티 효과로 에러는 감소하나, 그 감소율은 점차 줄어든다.

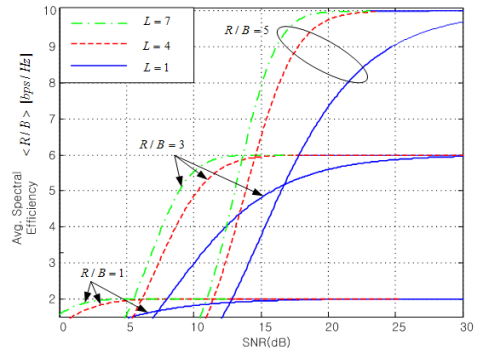


그림 3. 대칭링크에서 스펙트럼 효율에 따른 채널의 평균 스펙트럼 효율 ($\bar{\gamma}_{S_1 r^*} = \bar{\gamma}_{r^* S_2}$)

Fig. 3. Average spectral efficiency for different spectral efficiencies in symmetric channel ($\bar{\gamma}_{S_1 r^*} = \bar{\gamma}_{r^* S_2}$)

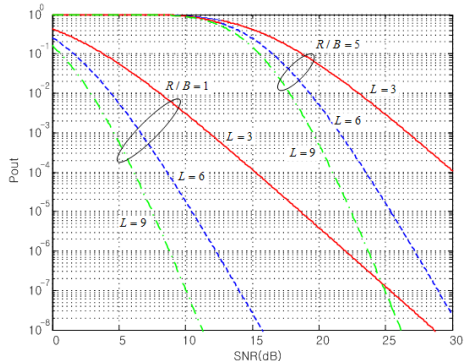


그림 4. 대칭링크에서 스펙트럼 효율에 따른 오수신율 ($\bar{\gamma}_{S_1 r^*} = \bar{\gamma}_{r^* S_2}$)

Fig. 4. Outage probability for different spectral efficiencies in symmetric link ($\bar{\gamma}_{S_1 r^*} = \bar{\gamma}_{r^* S_2}$)

그림5는 데이터 비대칭 링크에서 평균 오수신율을 나타내고 있다. 소스1-선택 릴레이-소스2의 데이터 속도가 동일한 경우($R_1 = R_2 = 1$ [bps])와 소스2-선택 릴레이-소스1의 데이터 속도가 10배 차이나는 경우($R_1 = 1, R_2 = 0.1$ [bps])의 오수신율을 비교한 결과이다.

이 그림5에서 볼 수 있는 바와 같이 릴레이의 수가 증가할수록 SNR 이득은 감소하였는데, 데이터 비대칭 정도가 10배 차이나면 SNR 이득은 단일 릴레이를 사용한 경우 ($L = 1$)와 9개의 릴레이를 사용한 경우 각각 2.7 dB와 0.5 dB로 나타났다. 한편 데이터 비대칭 링크의 경우에도 릴레이의 수에 따른 SNR 이득은 매우 큰 변화를 보였는데, 이는 평균 오수신율은 데이터 비대칭성 보다도 릴레이 수에 민감함을 알 수 있다.

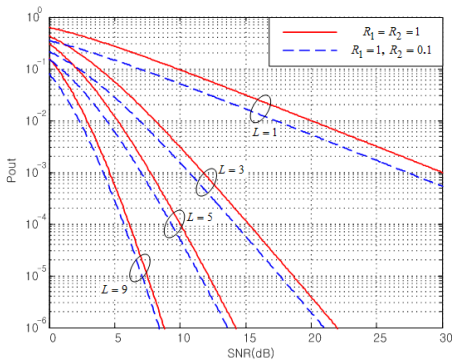


그림 5. 비대칭 채널에서 스펙트럼 효율에 따른 오수신율

$$(\bar{\gamma}_{S_1, r^*} = \bar{\gamma}_{r^*, S_2}, B = 1 [\text{Hz}])$$

Fig. 5. Outage probability for different spectral efficiencies in asymmetric link

$$(\bar{\gamma}_{S_1, r^*} = \bar{\gamma}_{r^*, S_2}, B = 1 [\text{Hz}])$$

VI. 결론

무선채널의 페이딩을 극복하고 통신의 신뢰도를 향상 시키며, 전송전력을 줄일 수 있는 릴레이 통신방식에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 그런데 양방향 통신을 가정할 때 릴레이를 사용하면 4 타임슬롯을 이용해서 데이터를 전송해야 하나, 네트워크 코딩을 이용하면 3 타임 슬롯으로도 양방향의 데이터를 전송할 수 있어서 네트워크 코딩을 무선채널의 데이터 전송에 도입한 활발한 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 논문에서는 네트워크 코딩을 사용할 때 여러 개의 병렬 릴레이 중 병목 현상이 가장 적은 릴레이를 선택하여 양방향의 데이터를 전송할 때 소스1-선택 릴레이 및 선택 릴레이-소스2 사이의 평균 SNR의 변화에 따른 채널 용량을 유도하였다.

병목현상이 가장 적은 릴레이를 선택할 때, 병렬 릴레이의 수가 증가할수록 공간 다이버시티에 의한 SNR 이득이 증가함을 알 수 있었다. 이는 동일한 의미로 평균 전송 용량은 릴레이의 수가 증가할수록 증가한다고 해석할 수 있다. 주어진 조건($R/B = 1$ [bps/Hz]) 하에서 평균 스펙트럼 효율의 95%에 도달하려면 릴레이가 하나인 경우 35 dB가 필요하였는데, 9개로 증가하면 1.4 dB로 SNR 이득은 11.6 dB를 얻었다. 따라서 본 논문에서 적용한 릴레이 선택방법은 적용하지 않은 경우에 대해서 매우 큰 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

또한 데이터 비대칭 링크의 경우, 데이터 비대칭 정도가 10배 차이가 나도 SNR 이득은 단일 릴레이를 사용한 경우 ($L = 1$)와 9개의 릴레이를 사용한 경우 각각 2.7 dB와 0.5 dB를 얻었다. 그러나 이 경우에도 릴레이 수의 증가에 따른 SNR 이득은 25 dB 이상의 변화를 보였는데, 이는 평균 오수신율은 데이터 비 대칭성보다 릴레이 수에 더욱 영향을 받는 것으로 해석된다.

향후에는 여러 가지 릴레이 선택방법에 따른 네트워크 코딩 시스템의 채널 용량 및 성능의 변화를 비교할 예정이다.

References

- [1] R. Ahlswede, Ning Cai, S-Y Robert Li, and Raymond W. Yeung, "Network information flow," IEEE Trans. on Information theory, vol.46, no.4, pp.1204-1216, July 2000.
- [2] 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.3, pp.659-672, Mar. 2006.
- [3] D. S. Michalopoulos and G. K. Karagiannidis, "Performance analysis of single relay selection in Rayleigh fading," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol.7, no.10, pp.3718-3724, Oct.

- 2008.
- [4] Nam-Soo Kim, "Incremental best relay selection system with outdated CSI in Rayleigh fading channels," *Journal of IWIT*, vol.12, no.5, pp.17-23, Oct. 2012.
- [5] S. Zhu and Kin K. Leung, "Distributed cooperative routing for UWB ad-hoc networks," *Proceedings of International Conference on Communications (ICC '07)*, pp.3339-3344, June 2007.
- [6] Z. Ding, Kin K. Leung, D. L. Goeckel, and Don Towsley, "On the study of network coding with diversity," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol.8, no.3, pp.1247-12569, March 2009.
- [7] A. Adinoyi, Y. Fan, H. Yanikomeroglu, and H. V. Poor, "On the performance of selection relaying," *Proc. 68th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC2008-Fall*, pp.1-5, Sep. 2008.
- [8] Kamel Tourki, Hong-Chuan Yang, and Mohamad-Slim Alouini, "Accurate outage analysis of incremental decode-and-forward opportunistic relaying," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol.10, no.4, pp. 1021-1025, April 2011.
- [9] Y. Li, R. Y. Louie, and B. Vucetic, "Relay selection with network coding in two-way relay selection," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.59, no.9, pp. 4489-4499, Nov. 2010.
- [10] Q. You, Y. Li, and Z. Chen, "Joint relay selection and network coding using decode-and-forward protocol in two-way relay channel," *Proceedings of Globecom 2010*, pp. 1-6, Dec. 2010.
- [11] Wei Li, Jie Li, and Pingyi Fan, "Network coding for two-way relaying networks over Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.99, no.9, pp.4478-4488, Nov. 2010.

저자 소개

김 남 수(정회원)



- 1986년 ~ 1994년 : ETRI(전자 통신 연구원) 이동통신 연구단 무선 기술 실장 역임
- 1991년 : 연세대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 1991년 ~ 1991년 : BNR(Bell Northern Research) 방문연구원
- 2002년 ~ 2003년: NJIT(New Jersey Institute of Technology) 교환교수
- 1994년 ~ 현 재 : 청주대학교 전자공학과 교수
- 2006년 ~ 2007년 : 청주대학교 학술정보처장
- 2010년 ~ 2010년 : 청주대학교 입학처장

※ 이 논문은 2013~2015학년도에 청주대학교 산업과학 연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.