

# Rician fading 채널에서 협력통신을 위한 coded cooperation의 성능분석

준회원 이재영\*, 김성일\*, 임현호\*, 종신회원 허준\*\*

## Performance Analysis of Coded Cooperation over Rician Fading Channel

Jae-Young Lee\*, Sung-il Kim\*, Hyun-Ho Im\* *Associate Members*,  
Jun Heo\*\* *Lifelong Member*

### 요약

본 논문에서는 협력통신을 위한 coded cooperation 시스템의 성능 분석을 기술한다. Coded cooperation은 user cooperation과 채널 부호의 결합된 프로토콜로서 기존의 coded cooperation의 연구는 주로 이동통신 환경을 고려한 Rayleigh fading 채널에서 이루어 졌다. 최근에 초고속 근거리 무선전송을 위한 60GHz 대역의 반송파를 이용한 연구가 활발해지면서 Rician fading 채널 기반의 협력통신 분석에 대한 필요성이 제기되었다. 본 논문에서는 coded cooperation 시스템의 outage probability 성능과 bit error probability의 성능을 Rician fading 채널에서 분석하고 Rayleigh fading 채널에서와 같이 다이버시티 오더 값이 2로 유지됨을 보인다.

**Key Words** : Coded cooperation, Rician fading channel, Outage probability, Bit error probability

### ABSTRACT

In this paper, we derive the performance analysis of the coded cooperation over a Rician fading channel. A new scheme called coded cooperation was suggested by using user cooperation and channel codes simultaneously. In previous works, it was verified that the coded cooperation schemes have better performance than other relay schemes in a Rayleigh fading channel. However, the high speed short range indoor wireless communication system has recently attracted research attention and its channel with very high carrier frequency(60GHz) can be typically modeled as a Rician fading channel. We derive analytical outage probabilities and bit error probabilities of the coded cooperation over the Rician fading channel and prove it to have full diversity order.

### I. 서론

페이딩의 영향을 최소화 하는 것은 이동 통신 시스템에서 항상 중요한 이슈이며, 그 중 다이버시티를

이용하는 것이 효율적으로 페이딩 채널을 극복하는 무선 통신 기법으로 널리 사용되고 있다. 여러 가지 다이버시티 기법 중에서 공간 다이버시티를 이용하는 다중 안테나 전송 기법 MIMO(Multiple Input

\* 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2008-F006-02, 테라헤르츠 대역 근거리 무선 통신시스템 연구]

\* 고려대학교 전자전기공학과(jy4213@korea.ac.kr, dudu@korea.ac.kr, linhh2@korea.ac.kr),

\*\* 고려대학교 전기전자전파공학과 (junheo@korea.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-10-491, 접수일자 : 2009년 10월 28일, 최종논문접수일자 : 2010년 2월 19일

Multiple Output) 기술이 최근 이동통신 연구의 주요한 연구 분야였다.

하지만, 현실적으로 단말기에 많은 안테나를 삽입하는 것은 공간적인 측면이나 복잡도 측면에서 제약이 생기므로 MIMO 기술을 이용하지 않고도 공간 다이버시티 효과를 얻기 위한 방법으로 소스노드와 목적노드 사이에 중계노드 즉 릴레이를 삽입하는 협력통신이 제안되었다<sup>[1]</sup>. 이러한 협력 통신은 증폭 후 전송(AF) 과 복호 후 전송(DF)의 두 가지 프로토콜로 크게 분류 할 수 있다. AF프로토콜은 복잡도가 작지만 노이즈가 증폭 되는 단점이 있고 DF는 복잡도가 크지만 릴레이가 복호에 성공한 경우에는 AF에 비하여 향상된 성능을 나타낸다. 또한 최근에 릴레이의 역할을 각 유저가 수행하는 user cooperation이 제안되었고<sup>[2]</sup> 그 중 채널 코드와 user cooperation이 결합된 coded cooperation이 제안되었다<sup>[3,4]</sup>. 기존의 coded cooperation은 이동통신 환경을 주로 고려하여 Rayleigh fading 채널환경에서 outage probability와 bit error probability에 대해서 분석<sup>[3-5]</sup>이 진행되었다.

한편, 최근 높은 캐리어 주파수를 이용한 초고속의 근거리 무선 통신에 대한 연구가 활발해지고 특히 60GHz 대역을 이용한 multi-giga 비트 전송 시스템에 대한 연구가 WPAN과 WLAN 양 쪽 분야에서 활발하게 연구되고 있다. 60GHz 대역의 높은 반송파 대역은 신호의 직진성이 강해서 LOS(Line of Sight)에 의해서 대부분의 파워가 전송되며 이것은 Rician fading 채널로 모델링 될 수 있다. 또한 강한 직진성으로 인하여 LOS가 블로킹되는 경우에 통신의 연속성을 위하여 릴레이를 적용한 회피경로를 마련해야 하므로 협력통신에 대한 요구사항이 존재한다. 본 논문에서는 coded cooperation의 outage probability와 bit error probability를 Rician fading 채널 환경에서 분석하며 Rician fading 채널에서 coded cooperation이 full diversity를 갖는 것을 보인다.

## II. 본 론

### 2.1 시스템 모델과 기존 연구

#### 2.1.1 시스템 모델

본 논문에서는 2명의 서로 다른 유저가 존재하고 1개의 목적노드가 있는 네트워크를 가정한다. 각 유저는 릴레이역할을 하는 다른 유저를 통해서 정보를 보내고 또한 각 유저는 직접 목적노드로 정보를 전송한다. 본 논문은 모든 전송 모드를 두 번의 frame을 통

해서 전송하는 half-duplex를 가정하고 채널의 변화는 slow fading으로 가정한다. 각 노드에서 받는 신호는 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$r_{i,j} = \alpha_{i,j}x_j + n_j \quad (1)$$

이때,  $r_{i,j}$ 는 node i와 j사이의 받은 신호를 나타내며,  $\alpha_{i,j}$ 는 node i와 j사이의 채널 이득을 나타낸다. 또한  $n_j$ 는 백색 가우시안 잡음을 나타낸다. 본 논문에서는 fading 채널의  $|\alpha|^2SNR$ 를 instantaneous 신호 대 잡음비  $\gamma$ 로 정의한다.

일반적인 outage를 구하기 위해서 나타내는 채널 용량은 다음과 같이 표시 할 수 있으며

$$C(\gamma) = \log_2(1 + \gamma)(b/s/Hz) \quad (2)$$

outage probability는 채널 용량이 threshold R보다 작을 때 발생하고  $C(\gamma) < R$ , 확률 분포 함수를 통해서 나타낸 outage probability는 다음과 같다.

$$P_{out} = \Pr\{\gamma < 2^R - 1\} = \int_0^{2^R - 1} p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (3)$$

본 논문에서 가정하고 있는 Rician fading channel에서는 다음과 같은 non-central chi-square 확률분포를 이용하고 있다.

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{(1+K)e^{-K}}{\Gamma} e^{-\frac{(1+K)\gamma}{\Gamma}} I_0\left(2\sqrt{\frac{K(1+K)\gamma}{\Gamma}}\right) \quad (4)$$

이때, K는 전체 중에 LOS가 차지하는 비중을 나타내는 Rician factor 이고  $\gamma$  는 instantaneous 신호 대 잡음비를 나타내며  $\Gamma$  는 fading channel사이의 평균 신호 대 잡음비 값을 나타낸다. 위의 확률 분포를 바탕으로 Rician fading에서의 outage probability를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \Pr\{\gamma_{i,j} < 2^R - 1\} \\ &= \int_0^{2^R - 1} \frac{(1+K_{i,j})e^{-K_{i,j}}}{\Gamma_{i,j}} e^{-\frac{(1+K_{i,j})\gamma_{i,j}}{\Gamma_{i,j}}} I_0\left(2\sqrt{\frac{K_{i,j}(1+K_{i,j})\gamma_{i,j}}{\Gamma_{i,j}}}\right) \\ &= 1 - Q_1(\sqrt{2K_{i,j}}, \sqrt{2r/\mu_{i,j}}) \end{aligned} \quad (5)$$

이때, i, j는 네트워크에 있는 각 노드를 나타내고,  $r = 2^R - 1$ ,  $\mu_{i,j} = \Gamma_{i,j}/(1+K_{i,j})$ ,  $Q_1$ 는 first order

Marquim-Q function를 나타낸다.

한편, 본 논문에서는 채널 코드를 memory size  $M=4$ 이고 천공 주기(punctured period)  $P=8$ 인 1/4인 mother code를 갖는 rate-compatible punctured convolution(RCPC) codes를 이용한다. 유저 data의 block size  $K=128$  bits이고 전체 code rate  $R=1/4$ 인 채널 부호를 사용한다. 또한 각 유저에서 목적노드로 보내는 신호 대 잡음비는 모두 같다고 가정한다.

### 2.1.2 Coded cooperation

Coded cooperation은 user cooperation과 channel code의 결합된 프로토콜이다. 채널 코드를 이용하지 않은 기존의 릴레이들은 받은 신호를 복호하고 다시 인코딩 하는 repetition based의 방식인 반면에 채널 코드를 이용하는 coded cooperation은 받은 신호의 패리티를 전송하는 알고리즘이다. 한편, [5]에서 불완전한 source-relay channel를 위해 adaptive DF를 제안했다. Adaptive DF 프로토콜은 릴레이가 복호에 실패했다는 것을 소스가 알았을 경우 자신의 정보를 추가로 전송하는 알고리즘이다. Coded cooperation도 유저 1과 릴레이(유저 2)사이를 error-free라고 가정하지 않으므로써 릴레이가 복호에 실패하는 상황에 대해서 대비하였다. 즉 coded cooperation은 각 유저가 파트너와 목적노드로 정보를 전송하고 복호에 성공한 유저는 받은 신호의 패리티를 보내고 복호에 실패한 유저는 자신의 정보를 추가로 보내주는 알고리즘이다. 따라서 coded cooperation은 채널코딩을 이용하는 adaptive DF라고 할 수 있다.

## 2.2 Rician fading 채널에서의 Coded cooperation 성능분석

### 2.2.1 Rician fading 채널에서 Coded cooperation의 outage probability 성능 분석

이번 절에서는 coded cooperation에 동작에 대해서 자세히 설명하고 각 경우에 대한 outage probability를 분석 한다. 그림 1은 coded cooperation의 각 유저의 복호 여부에 따라서 나뉜 4가지 경우를 나타낸다. 각 case를 결정하는 유저 사이의 채널 용량은  $\alpha \log_2(1+\gamma_{1,2})$ 와 같고 이때 알파는 첫 번째 프레임의 비트와 보내는 모든 비트 사이의 비율이다.

$$\alpha = \frac{N_1}{N} = \frac{R_1}{R} \quad (6)$$

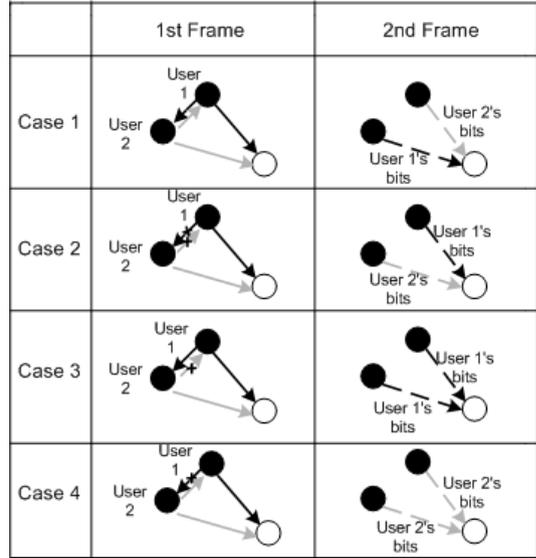


그림 1. Coded cooperation의 전송 프로토콜

본 논문에서는 두 번째 프레임에서 발생하는 outage probability만 분석하고 첫 번째 프레임은 생략한다. 각 case에 대한 outage probability는  $\theta = \{1, 2, 3, 4\}$ 을 통해서 나타낼 수 있다.

**Case 1** : 두 명의 유저가 모두 첫 번째 전송한 정보를 복호에 성공한 경우이다. 따라서 두 번째 프레임에 전송할 정보는 각각 상대방 정보의 패리티 정보를 보내게 된다. 이에 목적노드는 첫 번째 프레임에 해당 유저가 목적노드로 직접 전송한 정보와 상대방이 해당 유저의 정보를 복호에 성공해서 보낸 패리티 정보를 MRC(Maximum Ratio Combining)기법을 통하여 통합한다. 따라서 목적노드에서 각 유저의 outage 발생은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{1,d}(\theta = 1) &= \alpha \log_2(1 + \gamma_{1,d}) \\ &\quad + (1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma_{2,d}) < R \\ C_{2,d}(\theta = 1) &= \alpha \log_2(1 + \gamma_{2,d}) \\ &\quad + (1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma_{1,d}) < R \end{aligned} \quad (7)$$

이 때, 아래첨자 1, d는 유저 1과 목적노드 사이의 채널을 나타내고 아래첨자2, d는 유저 2와 목적노드 사이의 채널을 나타낸다.

**Case 2** : 두 유저 모두가 복호에 실패한 경우이다. 따라서 두 번째 프레임에서 각 유저들은 자신의 parity를 전송한다. 따라서 목적노드에서의 outage 발생은

다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{1,d}(\theta = 2) &= \log_2(1 + \gamma_{1,d}) < R \\ C_{1,d}(\theta = 2) &= \log_2(1 + \gamma_{2,d}) < R \end{aligned} \quad (8)$$

**Case 3** : 유저 2는 유저 1의 정보를 복호하지 못하고 반대로 유저 1은 유저 2의 정보를 복호에 성공한다. 따라서 유저 2는 자신의 패리티 정보를 보내고 유저 1의 패리티를 보낸다. 즉 두 유저 모두 유저 2의 패리티를 전송한다. 따라서 Case 3에서의 각 유저 입장에서의 outage 발생은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} C_{1,d}(\theta = 3) &= \alpha \log_2(1 + \gamma_{1,d}) \\ &\quad + (1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma_{1,d} + \gamma_{2,d}) < R \\ C_{1,d}(\theta = 3) &= \alpha \log_2(1 + \gamma_{2,d}) < R \end{aligned} \quad (9)$$

**Case 4** : Case 3과 각 유저의 역할만 반대의 경우로 유저 1은 복호에 성공하고 유저 2는 복호에 실패한다. 따라서 outage 발생은 유저 1의 정보는 첫 번째 프레임에 전송한 정보에 의해서 결정된다.

$$\begin{aligned} C_{1,d}(\theta = 4) &= \alpha \log_2(1 + \gamma_{2,d}) < R \\ C_{1,d}(\theta = 4) &= \alpha \log_2(1 + \gamma_{1,d}) \\ &\quad + (1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma_{1,d} + \gamma_{2,d}) < R \end{aligned} \quad (10)$$

위의 각 경우를 통해서 coded cooperation에 대한 전체 outage probability를 구할 수 있다. 먼저 각 유저의 신호 대 잡음비가 독립인 independent inter-user case에서 유저 1의 outage probability는 아래와 같이 나타낼 수 있고 유저 1과 유저 2의 outage probability는 순서만 다르고 동일하므로 본 논문에서는 유저 1에 대한 outage probability만 분석한다.

$$\begin{aligned} P_{out,1} &= \Pr\{\gamma_{1,2} > 2^{R/\alpha} - 1\} \Pr\{\gamma_{2,1} > 2^{R/\alpha} - 1\} \\ &\quad \cdot \Pr\{(1 + \gamma_{1,d})^\alpha (1 + \gamma_{2,d})^{1-\alpha} < 2^R\} \\ &\quad + \Pr\{\gamma_{1,2} < 2^{R/\alpha} - 1\} \Pr\{\gamma_{2,1} < 2^{R/\alpha} - 1\} \\ &\quad \cdot \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^R - 1\} \\ &\quad + \Pr\{\gamma_{1,2} > 2^{R/\alpha} - 1\} \Pr\{\gamma_{2,1} < 2^{R/\alpha} - 1\} \\ &\quad \cdot \Pr\{(1 + \gamma_{1,d})^\alpha (1 + \gamma_{1,d} + \gamma_{2,d})^{1-\alpha} < 2^R\} \\ &\quad + \Pr\{\gamma_{1,2} < 2^{R/\alpha} - 1\} \Pr\{\gamma_{2,1} > 2^{R/\alpha} - 1\} \\ &\quad \cdot \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^{R/\alpha} - 1\} \end{aligned} \quad (11)$$

위의 식을 Rician fading 채널을 반영하여 식을 정리 하면

$$\begin{aligned} P_{out,1} &= Q_1(\sqrt{2K_{1,2}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{1,2}}}) \cdot Q_1(\sqrt{2K_{2,1}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{2,1}}}) \\ &\quad \cdot \iint_A \Phi(\gamma_{1,d}, \gamma_{2,d}, \Gamma_{1,d}, \Gamma_{2,d}) d\gamma_{1,d} d\gamma_{2,d} \\ &\quad + \left(1 - Q_1(\sqrt{2K_{1,2}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{1,2}}})\right) \cdot \left(1 - Q_1(\sqrt{2K_{2,1}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{2,1}}})\right) \\ &\quad \cdot \left(1 - Q_1(\sqrt{2K_{1,d}}, \sqrt{\frac{2(2^R - 1)}{\mu_{1,d}}})\right) \\ &\quad + Q_1(\sqrt{2K_{1,2}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{1,2}}}) \cdot \left(1 - Q_1(\sqrt{2K_{2,1}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{2,1}}})\right) \\ &\quad \cdot \iint_B \Phi(\gamma_{1,d}, \gamma_{2,d}, \Gamma_{1,d}, \Gamma_{2,d}) d\gamma_{1,d} d\gamma_{2,d} \end{aligned} \quad (12)$$

와 같이 되며 여기서

$$\begin{aligned} r &= 2^{R/\alpha} - 1, \mu_{i,j} = \Gamma_{i,j} / (1 + K_{i,j}) \\ A &\equiv \{(\gamma_{1,d}, \gamma_{2,d}) : (1 + \gamma_{1,d})^\alpha (1 + \gamma_{2,d})^{1-\alpha} < 2^R\} \\ B &\equiv \{(\gamma_{1,d}, \gamma_{2,d}) : (1 + \gamma_{1,d})^\alpha (1 + \gamma_{1,d} + \gamma_{2,d})^{1-\alpha} < 2^R\} \\ \Phi(\Gamma_{1,d}, \Gamma_{2,d}, R, \alpha) &= p(\gamma_{1,d}) \cdot p(\gamma_{2,d}) \end{aligned} \quad (13)$$

을 나타낸다.  $p(\gamma_{1,d})$ 와  $p(\gamma_{2,d})$ 는 non-central chi-square 분포를 갖는다. 다음으로, reciprocal inter-user에 대해서 outage probability 성능을 분석한다. 유저 1과 유저 2의 instantaneous 신호 대 잡음비가 일정하므로 ( $\gamma_{1,2} = \gamma_{2,1}$ ) 경우 3과 경우 4는 발생하지 않는다. 결과적으로 우리는 식 (11) 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out,1} &= \Pr\{\gamma_{1,2} > 2^{R/\alpha} - 1\} \\ &\quad \cdot \Pr\{(1 + \gamma_{1,d})^\alpha (1 + \gamma_{2,d})^{1-\alpha} < 2^R\} \\ &\quad + \Pr\{\gamma_{1,2} < 2^{R/\alpha} - 1\} \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^R - 1\} \end{aligned} \quad (14)$$

본 논문은 Rician fading channel에서의 coded cooperation를 고려하므로 식 (14)는 식 (5)를 이용해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out,1} &= Q_1(\sqrt{2K_{1,2}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{1,2}}}) \\ &\quad \cdot \left[1 - Q_1(\sqrt{2K_{1,d}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{1,d}}}) - \Psi_1(\Gamma_{1,d}, \Gamma_{2,d}, R, \alpha)\right] \\ &\quad + \left[1 - Q_1(\sqrt{2K_{1,2}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{1,2}}})\right] \\ &\quad \cdot \left[1 - Q_1(\sqrt{2K_{1,d}}, \sqrt{\frac{2(2^R - 1)}{\mu_{1,d}}})\right] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

$$\begin{aligned} r &= 2^{R/\alpha} - 1, \mu_{i,j} = \Gamma_{i,j} / (1 + K_{i,j}) \\ \Psi_1(\Gamma_{1,d}, \Gamma_{2,d}, R, \alpha) &= \int_0^\alpha Q_1(\sqrt{2K_{1,d}}, \sqrt{\frac{2(2^R - 1)}{\mu_{1,d}}}) p(\gamma_{1,d}) d\gamma_{1,d} \\ a &= \frac{2^{R/(1-\alpha)}}{(1 + \gamma_{1,d})^{\alpha/(1-\alpha)} - 1} \end{aligned} \quad (16)$$

을 나타낸다.

### 2.2.2 Rician fading 채널에서 Coded cooperation의 다이버시티 오더 분석

본 절에서는 앞 절에서 분석한 Rician fading 채널에서의 coded cooperation의 전체 outage probability가 full diversity order를 갖는다는 것을 [4]의 방법을 이용해서 증명한다. 증명은 coded cooperation의 reciprocal inter-user case에 대해서 이루어지며, independent inter-user case에 대해서는 쉽게 확장 될 수 있다. 우선, Rician fading 채널에서 coded cooperation이 full diversity를 구하기 위해서 우리는 다음과 같은 [6]에 있는 modified Bessel function의 bound를 이용한다.

$$I_0(ax) \leq \exp(ax) \quad (17)$$

다음으로, diversity order를 구하기 위해서 우리는 평균 신호 대 잡음비  $\Gamma_{i,j}$ 를 다음과 같이 re-parameterize해야 한다.

$$\Gamma_{i,j} \rightarrow \Gamma_T \cdot \Gamma_{i,j} \quad (18)$$

이때  $\Gamma_T$ 는 사용자가 보낸 파워와 받은 노이즈간의 비율을 나타내고  $\Gamma_{i,j}$ 는 상수 값으로 path loss와 shadowing effect에 대한 영향을 나타낸다. 본 논문에서는 모든 유저의  $\Gamma_T$ 의 값이 동일하고 각 채널에서 다른 fading의 영향을  $\Gamma_{i,j}$ 통해서 나타낸다고 가정한다. 이 re-parameterize를 통해서 outage probability가  $1/\Gamma_T$ 의 함수로 표현가능하며  $\Gamma_T$ 를 증가시킬 때 ( $\Gamma_T \rightarrow \infty$ ) 해당 outage probability의  $1/\Gamma_T$ 의 최소의 지수가 diversity order를 나타낸다.

Reciprocal inter-user case에서 coded cooperation의 diversity order를 구하기 위해서 우리는 먼저 (17)와 Taylor's series를 이용해서 식을 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out,1} &= \Pr\{\gamma < 2^R - 1\} \\ &= \int_0^r \frac{(1+K)e^{-K}}{\Gamma} \exp\left(-\frac{(1+K)\gamma}{\Gamma}\right) I_0\left(\sqrt{\frac{K(1+K)\gamma}{\Gamma}}\right) d\gamma \\ &\leq \int_0^r \frac{1+K}{\Gamma} \exp\left(-K - \frac{(1+K)\gamma}{\Gamma} + \sqrt{\frac{K(1+K)\gamma}{\Gamma}}\right) d\gamma \\ &= \left(\frac{1+K}{\Gamma}\right) \int_0^r 1 + \left(-K - \frac{(1+K)\gamma}{\Gamma} + \sqrt{\frac{K(1+K)\gamma}{\Gamma}}\right) \\ &\quad + \frac{1}{2}\left(K^2 + \frac{6K(1+K)\gamma}{\Gamma} - 4K\sqrt{\frac{K(1+K)\gamma}{\Gamma}}\right) d\gamma \end{aligned} \quad (19)$$

이때,  $r = 2^R - 1$ 이고 현재 네트워크의 유저가 2명 존재하기 때문에 diversity가 2임을 증명해야 한다. 따라서  $1/\Gamma_T$ 의 지수가 2보다 큰 값은 고려되지 않고

$O\left(\frac{1}{\Gamma^2}\right)$ 에 전부 포함된다. 위의 식을 바탕으로

re-parameterize한 outage probability는

$$\begin{aligned} 1 - Q_1(\sqrt{2K}, \sqrt{\frac{2(2^R-1)}{\mu}}) &= \frac{(1+K)(1-K + \frac{1}{2}K^2)}{\Gamma_T \Gamma} (2^R-1) \\ &\quad + \frac{4(1+K)(1-2K)\sqrt{K(1+K)}}{3\Gamma_T^{\frac{3}{2}} \Gamma^{\frac{3}{2}}} (2^R-1)^{\frac{3}{2}} \\ &\quad + \frac{(3K - \frac{1}{2})(1+K)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma^2} (2^R-1)^2 + O\left(\frac{1}{\Gamma_T^2}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

또한 마찬가지로 coded cooperation의 reciprocal case의 diversity order를 구하기 위해서 식 (15)에 있는  $\Psi_1(\Gamma_{1,d}, \Gamma_{2,d}, R, \alpha)$ 를 다음과 같이 re-parameterize할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi_1(\Gamma_{1,d}, \Gamma_{2,d}, R, \alpha) &= \frac{(1+K_{1,d})(1-K_{1,d} + \frac{1}{2}K_{1,d}^2)}{\Gamma_T \Gamma_{1,d}} (2^{R/\alpha} - 1) \\ &\quad + \frac{4(1+K_{1,d})(1-2K_{1,d})\sqrt{K_{1,d}(1+K_{1,d})}}{3\Gamma_T^{\frac{3}{2}} \Gamma_{1,d}^{\frac{3}{2}}} (2^{R/\alpha} - 1)^{\frac{3}{2}} \\ &\quad + \frac{(3K_{1,d} - 1)(1+K_{1,d})}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{1,d}^2} (2^{R/\alpha} - 1)^2 \\ &\quad + \frac{(1+K_{1,d})(1-K_{1,d} + \frac{1}{2}K_{1,d}^2)(1-K_{2,d} + \frac{1}{2}K_{2,d}^2)}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{1,d} \Gamma_{2,d}} \Omega(R, \alpha) \\ &\quad + O\left(\frac{1}{\Gamma_T^2}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

이때  $\Omega(R, \alpha)$ 는 다음과 같다.

$$\Omega(R, \alpha) = \begin{cases} \left(\frac{\alpha}{1-2\alpha}\right) 2^{R/\alpha} - \left(\frac{\alpha}{1-2\alpha}\right) 2^{R/(1-\alpha)} + 1 & \alpha \neq \frac{1}{2} \\ R \cdot 2^{2R+1} \cdot \ln 2 - 2^{2R} + 1 & \alpha = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (22)$$

위의 두 식을 바탕으로 coded cooperation의 Rician fading 채널에서의 diversity order를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out,1} &= \frac{(1-K_{1,d} + \frac{1}{2}K_{1,d}^2)}{\Gamma_T^2} \\ &\quad \left[ \frac{(1+K_{1,2})(1+K_{1,d})(1-K_{1,2} + \frac{1}{2}K_{1,2}^2)}{\Gamma_{1,2} \Gamma_{1,d}} (2^{R/\alpha} - 1)(2^R - 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{(1+K_{2,d})(1-K_{2,d} + \frac{1}{2}K_{2,d}^2)}{\Gamma_{1,d} \Gamma_{2,d}} \Omega(R, \alpha) \right] \\ &\quad + O\left(\frac{1}{\Gamma^2}\right) \end{aligned} \quad (23)$$

위의 식에서  $1/\Gamma_T$ 의 최소 차수가 2이라는 것을 확인할 수 있고 이것은 coded cooperation이 Rician fading 채널에서 full diversity order를 갖는다는 것을 증명한다.

2.2.3 Rician fading 채널에서 Coded cooperation의 Bit error probability 성능 분석

이번 절에서는 Rician fading 채널에서 coded cooperation 기법에 대한 bit error probability를 분석한다. 본 절에서는 전체 case중에서 대표적으로 Case 1과 Case 3만 Rician fading에 대해서 수학적으로 분석해 본다.

Overall bit error probability를 구하기 전에 우리는 pairwise error probability(PEP)를 먼저 정의한다.

$$P(c \rightarrow e|\gamma) = Q\left(\sqrt{2 \sum_{n \in \eta} \gamma(n)}\right) \quad (24)$$

이때  $Q(x)$ 는 가우시안 Q-function를 나타내고  $\gamma(n)$ 은 수신된 instantaneous 신호 대 잡음비의 백터를 나타낸다. 또한  $c$ 는 전송한 codeword를 나타내고  $e$ 는 에러가 포함된 수신된 codeword를 의미한다.  $\eta$ 는 전송한 codeword와 수신된 codeword가 같지 않는 모든 집합( $c(n) \neq e(n)$ )을 나타내고 그 크기는  $c$ 와  $e$ 의 Hamming distance( $|\eta| = d$ )를 의미한다.

Coded cooperation에서 Case 1의 pairwise error probability를 살펴보면 아래와 같다.

$$P(d|\gamma_{1,d}, \gamma_{2,d}) = Q(\sqrt{2d_1\gamma_{1,d} + 2d_2\gamma_{2,d}}) \quad (25)$$

이때,  $d_1$ 과  $d_2$ 는 유저 1과 유저 2의 채널에서 상대적으로 발생하는 error event를 나타내고 두 변수는  $d_1 + d_2 = d$ 을 만족한다.

Unconditional PEP를 구하기 위해서 우리는 (25) 식을 fading distribution에 대해서 평균을 구할 수 있다.

$$P(d) = \int_0^\infty \int_0^\infty P(d|\gamma_{1,d}, \gamma_{2,d}) p(\gamma_{1,d}) p(\gamma_{2,d}) d\gamma_{1,d} d\gamma_{2,d} \quad (26)$$

각  $p(\gamma)$ 는 (4)와 같은 non-central chi-square 분포를 갖고 그것의 moment generating function(MGF)는 [7]를 이용해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_\gamma(s) = \frac{(1+K)}{(1+K)-s\Gamma} \exp\left(\frac{Ks\Gamma}{(1+K)-s\Gamma}\right) \quad (27)$$

위의 두 식을 이용해서 Rician fading 채널에서 unconditional PEP를 구하면,

$$P(d) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left[ \frac{(1+K)}{(1+K) + \frac{d_1\Gamma_{1,d}}{\sin^2\theta}} \exp\left(\frac{-\frac{d_1\Gamma_{1,d}}{\sin^2\theta} K}{(1+K) + \frac{d_1\Gamma_{1,d}}{\sin^2\theta}}\right) \right] \times \left[ \frac{(1+K)}{(1+K) + \frac{d_2\Gamma_{2,d}}{\sin^2\theta}} \exp\left(\frac{-\frac{d_2\Gamma_{2,d}}{\sin^2\theta} K}{(1+K) + \frac{d_2\Gamma_{2,d}}{\sin^2\theta}}\right) \right] d\theta \quad (28)$$

위의 식은 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$P(d) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{1 + \frac{d_1\Gamma_{1,d}}{1+K}} \exp\left(\frac{-d_1K\Gamma_{1,d}}{(1+K+d_1\Gamma_{1,d})}\right) \right] \times \left[ \frac{1}{1 + \frac{d_2\Gamma_{2,d}}{1+K}} \exp\left(\frac{-d_2K\Gamma_{2,d}}{(1+K+d_2\Gamma_{2,d})}\right) \right] \quad (29)$$

이때,  $\Gamma_{1,d}$ 와  $\Gamma_{2,d}$ 는 각 채널의 평균 신호 대 잡음비이고  $K$ 은 Rician factor를 나타낸다. coded cooperation의 Case 3 PEP를 구하면 다음과 같다.

$$P(d) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \left[ \frac{(1+K)}{(1+K) + \frac{d\Gamma_{1,d}}{\sin^2\theta}} \exp\left(\frac{-\frac{d\Gamma_{1,d}}{\sin^2\theta} K}{(1+K) + \frac{d\Gamma_{1,d}}{\sin^2\theta}}\right) \right] \times \left[ \frac{(1+K)}{(1+K) + \frac{d_2\Gamma_{2,d}}{\sin^2\theta}} \exp\left(\frac{-\frac{d_2\Gamma_{2,d}}{\sin^2\theta} K}{(1+K) + \frac{d_2\Gamma_{2,d}}{\sin^2\theta}}\right) \right] d\theta \quad (30)$$

Case 1과 마찬가지로 식 (30)에 대한 bound를 구할 수 있다.

$$P(d) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{1 + \frac{d\Gamma_{1,d}}{1+K}} \exp\left(\frac{-dK\Gamma_{1,d}}{(1+K+d\Gamma_{1,d})}\right) \right] \times \left[ \frac{1}{1 + \frac{d_2\Gamma_{2,d}}{1+K}} \exp\left(\frac{-d_2K\Gamma_{2,d}}{(1+K+d_2\Gamma_{2,d})}\right) \right] \quad (31)$$

PEP를 바탕으로 bit error 와 block error에 대해서 분석을 한다. 첫 번째 프레임의 block error probability는 다음과 같은 bound를 갖는다.

$$P_{block}(\gamma) \leq 1 - (1 - P_E(\gamma))^B \leq B \cdot P_E(\gamma) \quad (32)$$

이때,  $B$ 는 codeword의 trellis branch 개수이며  $P_E(\gamma)$ 는 유저 사이의 채널에서  $\gamma$  신호 대 잡음비에 따른 error 확률을 나타내고 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$P_E(\gamma) \leq \sum_{d=d_f}^{\infty} a(d)P(d|\gamma) \quad (33)$$

이때,  $d_f$  는 해당 code의 free distance를 나타내고  $a(d)$ 는 [8]에 있는 hamming weight가  $d$ 일 경우 발생하는 error event를 나타낸다. 따라서 위의 식을 바탕으로 Case 1, 3에서의 block error rate(BLER)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P(\theta=1|\gamma_{1,2}, \gamma_{2,1}) &= (1 - P_{block,1}(\gamma_{1,2}))(1 - P_{block,2}(\gamma_{2,1})) \\ &\leq (1 - P_{E,1}(\gamma_{1,2}))^B (1 - P_{E,2}(\gamma_{2,1}))^B \\ &\leq (1 - BP_{E,1}(\gamma_{1,2}))(1 - BP_{E,2}(\gamma_{2,1})) \\ P(\theta=3|\gamma_{1,2}, \gamma_{2,1}) &= (1 - P_{block,1}(\gamma_{1,2}))(P_{block,2}(\gamma_{2,1})) \\ &\leq (1 - P_{E,1}(\gamma_{1,2}))^B (P_{E,2}(\gamma_{2,1}))^B \\ &\leq (1 - BP_{E,1}(\gamma_{1,2}))(BP_{E,2}(\gamma_{2,1})) \end{aligned} \quad (34)$$

reciprocal inter-user case에서의 각 case의 발생확률 즉, unconditional BLER의 확률은 Case 1 과 3 에 대해서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(\theta=1) &\geq \int_0^{\infty} (1 - \min \left[ 1, \sum_{d=d_f}^{\infty} a(d)P(d|\gamma_{1,2}) \right])^B \\ &\quad (1 - \min \left[ 1, \sum_{d=d_f}^{\infty} a(d)P(d|\gamma_{1,2}) \right])^B p(\gamma_{1,2}) d\gamma_{1,2} \\ P(\theta=3) &\geq \int_0^{\infty} (1 - \min \left[ 1, \sum_{d=d_f}^{\infty} a(d)P(d|\gamma_{1,2}) \right])^B \\ &\quad (\min \left[ 1, \sum_{d=d_f}^{\infty} a(d)P(d|\gamma_{1,2}) \right])^B p(\gamma_{1,2}) d\gamma_{1,2} \end{aligned} \quad (35)$$

다음은 각 case에 대한 conditional bit error probability(BEP)를 구할 수 있는데, 그 값은 다음과 같은 bound를 갖는다.

$$P_b(\gamma, \theta) \leq \frac{1}{k_c} \sum_{d=d_f}^{\infty} c(d)P(d|\gamma, \theta) \quad (36)$$

이때,  $c(d)$ 는 codeword의 error 개수를 말하고  $k_c$ 는 각 code trellis의 branch에 들어가는 input bit 수를 의미한다. 위의 (36)을 이용하면 우리는 각 case에 대한 unconditional BEP를 얻을 수 있고 그 식은 아래와 같다.

$$P_b(\theta) \leq \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \min \left[ \frac{1}{2}, \frac{1}{k_c} \sum_{d=d_f}^{\infty} c(d)P(d|\gamma_{1,d}, \gamma_{2,d}, \theta) \right] p(\gamma_{1,d})p(\gamma_{2,d})d\gamma_{1,d}d\gamma_{2,d} \quad (37)$$

마지막으로 전체 bit error probability는 각 case의 평균 확률 곱해서 conditional bit error probability에 대한 평균을 구하면 가능하다. 따라서 end-to-end BEP는 각 해당 case의 (35)와 (37)곱으로 이루어진다.

$$P_b = \sum_{i=1}^4 P_b(\theta)P(\theta=i) \quad (38)$$

### III. 수치적 결과

이번 절에서는 앞 절에서 분석한 coded cooperation의 outage probability와 bit error probability를 성능을 비교 한다.

먼저, 그림 2는 Rician fading 채널에서의 유저와 목적노드 사이의 신호 비 잡음비(uplink SNR)에 따른 outage probability를 coded cooperation과 릴레이가 없는 no cooperation을 함께 나타내었다. Rician fading 채널은 Rician factor를 고려해 주어야 하므로 본 그림에서는 유저 사이의 K factor가 유저와 목적노드 사이의 K factor보다 3dB가 더 크도록 가정했으며 K factor를 달리하면서 실험하였다. 그림 2.를 통해서 우리는 K factor가 증가하면서 성능이 더 좋아진다는 것을 확인 할 수 있는데 이것은 K factor가 전체 중 LOS의 비율을 의미한다는 점에서 합당한 결과이다.

그림 3은 outage probability를 Rate(b/s/Hz) 증가시키면서 실험을 했으며 이번에는 유저사이의 K factor가 유저와 목적노드 사이의 K factor보다 5dB가 더 크도록 실험하였다. Rate가 증가할수록 outage probability가 발생할 확률은 증가하지만 Rate가 2에

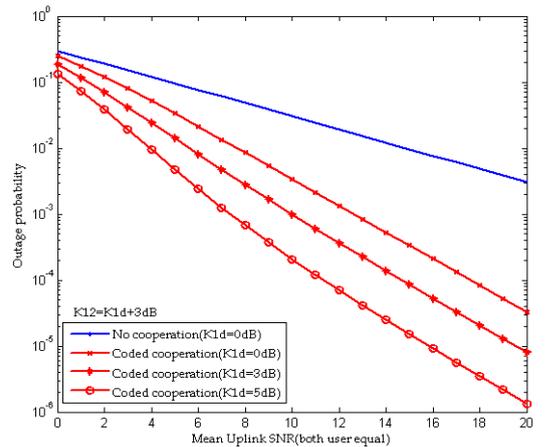


그림 2. R=0.5 b/s/Hz,  $\alpha=0.5$ ,  $K_{1,2} = K_{1,d} + 3dB$ 일 때 신호 대 잡음비에 따른 outage probability

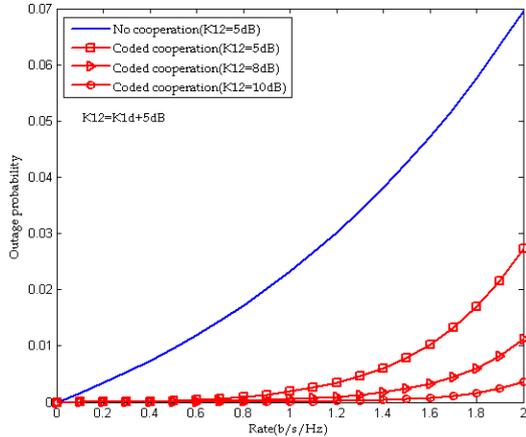


그림 3.  $\alpha=0.5$ ,  $\Gamma_{1,2} = \Gamma_{2,1} = \Gamma_{1,d} = \Gamma_{2,d} = 15dB$ ,  $K_{1,2} = K_{1,d} + 5dB$  일 때 Rate에 따른 outage probability

근접하더라도 여전히 coded cooperation은 direct 전송보다 더 좋은 성능을 갖고 있으며 그림 2와 마찬가지로 K 값이 증가함에 따라서 더 좋은 성능을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

그림 4는 coded cooperation의 Rician fading 채널에서 cooperation level( $\alpha=0.5$ )이 50%일 때 bit error probability를 나타낸다. 그림 4에 있는 perfect inter-user case는 유저 사이의 채널이 좋아서 Case 1만 계속 발생하는 것으로 가장 좋은 성능을 갖는다. 그림 4를 통해서 outage probability처럼 Rician factor에 따른 성능이득을 확인할 수 있으며 협력통신을 하지 않는 no cooperation 경우보다 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

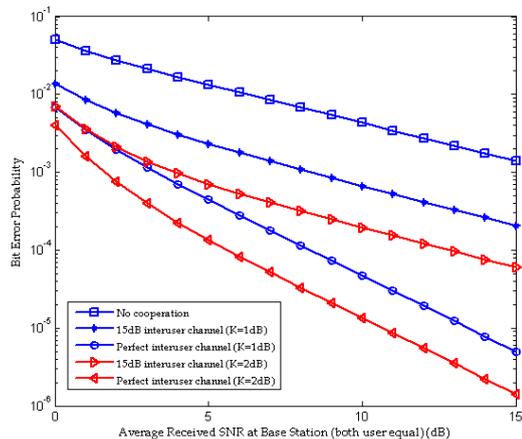


그림 4.  $\alpha=0.5$ ,  $\Gamma_{1,2} = \Gamma_{2,1} = 15dB$ ,  $K_{1,2} = K_{2,1} = K_{1,d} = K_{2,d}$  일 때 신호 대 잡음비에 따른 bit error probability

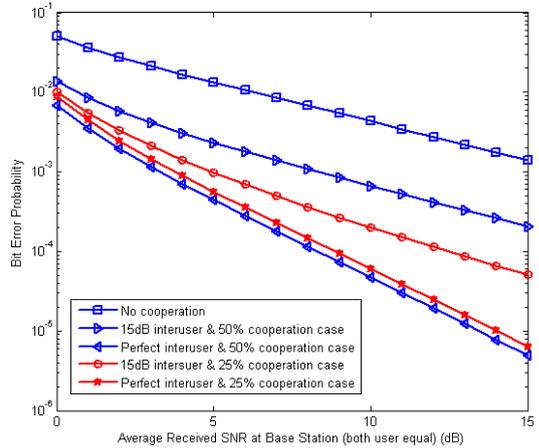


그림 5.  $\Gamma_{1,2} = \Gamma_{2,1} = 15dB$ ,  $K_{1,2} = K_{2,1} = K_{1,d} = K_{2,d}$  일 때 신호 대 잡음비에 따른 bit error probability

그림 5는 cooperation level에 따른 coded cooperation의 bit error probability를 나타낸다. Perfect inter-user case의 경우는 50% cooperation level이 25% cooperation level보다 더 좋은 성능을 나타낸다. 이것은 PEP를 나타내는 식 (25)이 50% cooperation level에서 최소가 되기 때문이다. 그러나 inter-user 채널이 perfect하지 않으면 25% cooperation level이 더 좋은 것을 나타낸다. 이것은 coded cooperation이 Case 1이 발생이 증가하면 성능이 증가하는데 25% cooperation level이 좀 더 많은 데이터를 첫 번째 프레임에 보내줌으로써 Case 1의 발생빈도를 상대적으로 증가시키기 때문이다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 Rician fading 채널에서의 coded cooperation 기법에 대한 outage probability와 bit error probability를 수학적으로 분석하고 수치적인 결과를 보였다. 본 논문의 결과를 통해서 Rayleigh fading에서 성능이득이 있었던 coded cooperation이 Rician fading 채널에서도 성능이득이 존재함을 확인했으며 Rician factor K를 증가함에 따라서 성능이득이 더 많아지는 것을 확인하였다. 또한 Rician fading 채널에서 coded cooperation이 full diversity를 갖는다는 것을 수학적으로 outage probability를 re-parameterize해서 증명하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity-Part 1: System description," *IEEE Transaction on. Communication*, Vol.51, No.11, pp.1927-1938, Nov. 2003.
- [2] J. Nicholas Laneman, David N.C.Tse, Gregory W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient protocols and Outage Behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.50, No.12, December 2004.
- [3] Todd E. Hunter, Aria Nosratinia, "Cooperation Diversity through Coding," inProc. *IEEE International Symposium on Information Theory*, Lassane, Switerland, Jum./Jul. 2002.
- [4] Todd E. Hunter, Aria Nosratinia, "Diversity through Coded Cooperation," *IEEE Transaction on. Wireless Communication*, Vol.5, No.2, February 2006.
- [5] Todd E. Hunter, Shahab Sanayei, Aria Nosratinia, "Outage Analysis of coded cooperation," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.52, No.2, February 2006.
- [6] Giovanni. E. Corazza, Gianluigi Ferrari, "New Bounds for the Marcum Q-Function," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.48, No.11, November 2002.
- [7] Marvin K. Simon, Moharmed-Slim Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, Wiley-Interscience.
- [8] J. Hagenauer, "Rate-compatible punctured convolution codes(RCPC codes) and their application," *IEEE Transaction on. Communication*, Vol.36, No.4, pp.389-400, April 1988.

김 성 일 (Sung-il Kim)

준회원



2009년 2월 고려대학교 전기 전자전파 공학과  
2009년 3월~현재 고려대학교 전자전기공학과 석사 과정  
<관심분야> 릴레이 네트워크, 채널코딩, 협력통신

임 현 호 (Hyun Ho Im)

준회원



2008년 8월 고려대학교 전기 전자전파 공학과  
2008년 9월~현재 고려대학교 전자전기공학과 석사 과정  
<관심분야> 네트워크 코딩, 정보이론

허 준 (Jun Heo)

중신회원



1989년 2월 서울대학교 전자 공학과  
1991년 2월 서울대학교 전자 공학과 석사  
2002년 2월 미국 USC 전자 공학과 박사  
2003년 1월~2007년 2월 건국대학교 전자공학부 조교수  
2007년 3월~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수  
<관심분야> 통신시스템, 채널코딩, MIMO

이 재 영 (Jae Young Lee)

준회원



2008년 2월 고려대학교 전파통신공학과  
2008년 3월~현재 고려대학교 전자기공학과 석·박사 통합 과정  
<관심분야> 릴레이 네트워크, 협력통신, 네트워크 코딩