

# 다중경로 레일리 페이딩 채널에 대한 DSF 릴레이 MC-CDMA 시스템의 평균 오류율 의사 분석 기법 Semi-Analytical Averaged Error Rate Evaluation for DSF-Relay MC-CDMA systems over Multipath Rayleigh Fading Channels

고 균 병\*

Kyun-Byoung Ko\*

## Abstract

In this paper, a semi-analytical approach is proposed for DSF(Decode and Selective Forward)-Relay MC-CDMA(MultiCarrier-Code Division Multiple Access) systems over multipath Rayleigh fading channels. Considering BER(bit error rate) performance and complexity, the MMSE-C(Minimum Mean squared Error-per subCarrier) is used as the combining method for MC-CDMA systems. At first, the analytical method based on error-events at relay nodes for DSF-Relay schemes is utilized in order to derive the averaged BER. Then, the averaged BER is expressed as the form considering possible all error-events. Also, proposed semi-analytical expressions have been verified by comparing with simulation results. Finally, it is verified that the derived analytical expressions can be a frame work to cover different multipath Rayleigh fading channel conditions and to measure the upper performance for DSF-Relay MC-CDMA systems.

## 요 약

본 논문에서는 DSF 릴레이 MC-CDMA 시스템에 대한 의사 성능분석 기법을 다중경로 레일리 페이딩 채널에 대해 제안한다. 오류율 성능과 복잡도를 고려하여 MC-CDMA 시스템의 결합기법으로는 MMSE-C 방법을 사용한다. 평균 오류율 유도를 위하여 DSF-Relay 기법의 릴레이 노드들에서 발생할 수 있는 오류 사건에 기반한 분석 방법을 우선 채택한다. 그리고 발생가능한 모든 오류 사건들을 고려한 형태로 평균 오류율을 표현한다. 또한 제안된 의사 분석적 성능분석 결과는 모의실험 결과와의 비교를 통하여 검증하도록 한다. 최종적으로 유도된 성능분석 결과가 다양한 다중경로 레일리 페이딩 채널 환경을 반영하면서 DSF 릴레이 MC-CDMA 시스템의 성능 상한 값을 측정할 수 있는 분석 틀이 될 수 있음을 확인한다.

*Key words* : DSF-Relay, MC-CDMA, multipath Rayleigh fading channels, BER, MMSE-C

\* 국립한국교통대학교 제어측정공학과 (Dept. of Control and Instrumentation Engineering, KOREA National University of Transportation)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2012-0003625).

接受日:2012年 05月 24日, 修正完了日: 2012年 06月 11日  
掲載確定日: 2012年 06月 14日

## 1. 서론

무선 통신에서 릴레이(Relay, R) 시스템은 송신단에서 큰 전력을 사용하지 않고도 통화 영역을 넓힐 수 있는 장점을 가지고 있다[1][2]. 또한, 페이딩 채널에서 무선 통신의 용량과 신뢰성을 증대시킬 수 있는 협력 다이버시티를 위해 이용할 수 있다[3][4]. 이러한

협력 통신은 증폭 후 전송(AF: Amplify and Forward)과 복호 후 전송(DF: Decoded and Forward)의 두 가지 프로토콜로 크게 분류 할 수 있다. DF는 릴레이가 송신국으로부터 수신한 신호를 복호 후 재생성하여 전송하는 방식으로 복잡도가 크지만 릴레이가 복호에 성공한 경우에만 재전송하는 DSF(Decoded and Selective Forward)의 경우 AF에 비하여 향상된 성능을 나타낸다[4]. 최근에는 이러한 DSF 릴레이 기법에 관한 성능분석에 관한 연구가 수행되었다. 특히, 참고문헌 [5]와 [6]에서는 송신국과 릴레이 사이의 링크에 대한 복호 오류 유무에 따라 오류 사건을 정의하고 이를 바탕으로 DSF 릴레이 기법에 관한 성능분석 기법을 제시하였다.

이와 병행하여 다중경로 페이딩 채널에서 강인성을 보이는 MC-CDMA(MultiCarrier-Code Division Multiple Access) 시스템에 DF 릴레이 기법을 적용한 연구 또한 수행되었다[7]. 특히 참고문헌 [7]에서는 DF 릴레이 기법의 가장 큰 단점인 직교 채널을 통한 재전송으로 야기되는 주파수 효율(Spectral Efficiency) 저하를 극복하기 위한 방법으로 순환 지연 다이버시티(Cyclic Delay Diversity: CDD) 방법을 적용하여 그 적용가능성을 검증하였다. 하지만 참고문헌 [7]에서는 DF 기법에 대한 모의실험 결과만을 제시하였으며 성능분석 기법은 제시하지는 못하였다.

본 논문에서는 DF 릴레이 보다 우수한 성능을 갖는 DSF 릴레이 기법을 MC-CDMA 시스템에 적용하고 다중경로 레일리 페이딩 채널에 대한 성능분석 방법을 제시하도록 한다. 즉, DSF 릴레이 기법에 대한 오류 사건 기반의 성능분석 방법[5][6]을 활용하여 MC-CDMA 시스템의 평균 오류율에 대한 의사-성능분석 기법을 제안하고 그 성능을 모의실험을 통하여 검증하도록 한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 DSF-Relay MC-CDMA 시스템 모델을 설명한다. 3장에서는 평균 오류율에 대한 의사 성능분석 기법을 제안하고 한다. 그리고 4장에서는 제안된 성능분석 결과를 모의실험 결과와 비교 분석하며 5장에서 결론을 맺는다.

## II. DSF-Relay MC-CDMA 시스템

DSF-Relay MC-CDMA 시스템에서는 그림 1과 같이 송신국(S: Source) 노드에서 MC-CDMA 심벌을  $R$ 개의 릴레이 및 수신국(D: Destination)으로 전송한다. 그리고 각 릴레이 노드들에서는 수신된 신호를 복조한 후 정확히 복조한 경우에만 재생성된 신호를

각각 직교 채널을 통하여 수신국으로 재전송한다.

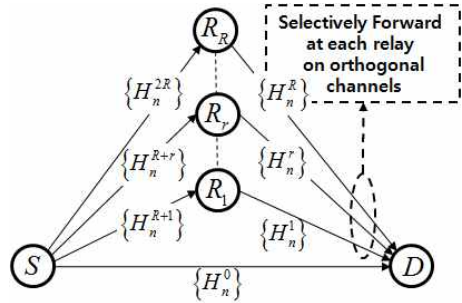


Fig. 1. Block diagram for DSF-Relay MC-CDMA System(source(S), destination(D), relay(R))

그림 1. DSF-Relay MC-CDMA 시스템 블록도(source(S), destination(D), relay(R))

### 1. MC-CDMA 송신 신호 모델

MC-CDMA 시스템의 송신기는 각 코드에 할당된 확산 코드를 사용하여 전송 심벌을 주파수 축에서 확산시키고, IFFT(inverse Fast Fourier Transform) 장치를 이용하여 신호를 시간 축으로 변환한다. 따라서 시간축의 이산 신호는 다음과 같이 표현된다[7][8].

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} b_m c_{m,n} \exp(j2\pi n t / N) \quad (1)$$

여기서  $t \in \{0, 1, \dots, N-1\}$  이고  $b_m = \pm 1$  는  $m$  번째 확산코드의 BPSK(Binary Phase Shifting Keying) 심벌,  $|c_{m,n}| = 1$  는  $m$  번째 확산코드의  $n$  번째 부반송파 코드를 나타낸다.  $N$  과  $M$  은 확산 코드의 길이 및 확산코드 수를 각각 나타낸다. 식 (1)의 시간영역 신호에 Cyclic Prefix 형태의 보호구간이 삽입되고 DAC(Digital to Analog Converter)를 거쳐 안테나를 통해 전송된다. 전송 신호는 각 링크의 다중경로 레일리 페이딩 채널을 통과한 후 가산성 백색 잡음(Additive White Gaussian Noise: AWGN)이 더해져 수신된다.

### 2. 다중경로 레일리 페이딩 채널 모델

본 논문에서는 여러 심벌 구간 동안 채널 상태가 변하지 않는 의사 정적 다중경로 레일리 페이딩 채널을 가정한다[8-10]. 따라서  $r$  번째 링크의 다중 경로수가  $L^r$  일 때  $l$  번째 경로의 채널은  $h_l^r$

( $l=0,1,\dots,L^r-1$ )로 표현한다. 이때 채널 이득  $h_l^r$  을 크기가 레일리 분포를 갖고 위상은  $[0,2\pi)$  동안에 균일하게 분포하며 각 경로와 링크들 간에 상호 독립적인 랜덤 변수들로 가정한다. 그리고 다중경로 성분들의 정규화된 탭 간격을  $1/N$ 라고 할 때,  $r$ 번째 링크의  $n$ 번째 부반송파의 채널 응답은 다음과 같다[8].

$$H_n^r = \sum_{l=0}^{L^r-1} h_l^r \exp(-j2\pi nl/N) \quad (2)$$

본 논문에서는  $E\left[\sum_{l=0}^{L^r-1} |h_l^r|^2\right] = 1$  을 가정하며, 경로들 간의 지수함수적 감소 인자(Exponential Decay Factor)는  $1/L^r$ 로 가정한다. 따라서 그림 1에서  $\{H_n^0\}$ 는 S-D 링크의 주파수 축 채널 이득을 나타낸다. 또한  $\{H_n^{R+r}\}$  및  $\{H_n^r\}$ 는  $r$ 번째 S-D 링크와 R-D 링크의 주파수 축 채널 이득을 각각 나타낸다.

### 3. MC-CDMA 수신 신호 모델

MC-CDMA 시스템의 수신기 동작은 다음과 같다. 수신 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하고 보호구간을 제거한다. 그리고 FFT(Fast Fourier Transform) 장치를 이용하여 신호를 주파수 축으로 변환한다. 따라서 시간 및 주파수 동기가 완벽하다고 가정할 때,  $i$ 부반송파에 해당하는 이산 신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_i^r = b_0 H_i^r c_{0,i} + \sum_{m=1}^{M-1} b_m H_i^r c_{m,i} + n_i^r \quad (3)$$

여기서  $r=0$  즉,  $y_i^0$ 는 S-D 링크의 수신 신호를 의미하고  $y_i^{R+r}$  ( $r=1,2,\dots,R$ )는  $r$ 번째 S-R 링크의 수신 신호를 의미한다. 잡음 성분  $n_i^r$ 의 평균은  $E[n_i^r] = 0$ 이고 분산은  $E[|n_i^r|^2] = \sigma^2$  이다.

### 4. S-D 및 S-R 링크의 평균 오류율

본 논문에서는 성능 및 복잡도를 고려하여 MMSE-C(Minimum Mean Squared Error-per subCarrier) 결합기법을 고려한다[7]. 따라서 0번째 확

산코드에 대한 결합 계수는 다음과 같다.

$$w_{0,i}^r = \frac{c_{0,i}^* H_i^{r*}}{N(|H_i^r|^2 + \sigma^2/M)} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 통해  $r$ 번째 S-R 링크에 대한 결정변수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_0^{R+r} = \sum_{i=0}^{N-1} y_i^{R+r} w_{0,i}^{R+r} = \mu_0^{R+r} b_0 + \eta_0^{R+r} \quad (5)$$

여기서  $\mu_0^{R+r} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|H_i^{R+r}|^2}{N(|H_i^{R+r}|^2 + \sigma^2/M)}$  이고

$\eta_0^{R+r} = \sum_{i=1}^{N-1} \left( \sum_{m=1}^{M-1} b_m H_i^{R+r} c_{m,i} + n_i^{R+r} \right) w_{0,i}^{R+r}$  이다. 일반적인 CDMA 시스템의 성능분석에서 사용되는 가우시안 근사화를 가정할 때[9],  $\eta_0^{R+r}$ 의 평균은  $E[\eta_0^{R+r}] = 0$  이고 분산은 다음과 같다.

$$\text{Var}[\eta_0^{R+r}] = \sum_{m=1}^{M-1} \frac{1}{N^2} \left( \sum_{i=0}^{N-1} \frac{c_{m,i} c_{0,i} |H_i^{R+r}|^2}{|H_i^{R+r}|^2 + \sigma^2/M} \right)^2 + \frac{\sigma^2}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|H_i^{R+r}|^2}{(|H_i^{R+r}|^2 + \sigma^2/M)^2} \quad (6)$$

또한 식 (6)에서  $N=M$ 을 가정할 때, 식 (6)은  $\text{Var}[\eta_0^{R+r}] = \mu_0^{R+r} - (\mu_0^{R+r})^2$ 이 된다. 따라서 식 (5)에 대한 순시 SNR(Signal to Noise Ratio)은  $\gamma^{R+r} = (\mu_0^{R+r})^2 / \text{Var}[\eta_0^{R+r}]$ 로 표현할 수 있으며 조건부 오류율은 다음과 같다[10].

$$P_{R+r}(\gamma^{R+r}) = Q(\sqrt{2\gamma^{R+r}}) \quad (7)$$

여기서  $Q(\sqrt{2x}) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{\sqrt{2x}}^{\infty} \exp(-t^2/2) dt$ 이다.

평균 오류율은 식 (7)의 조건부 오류율  $P_{R+r}(\gamma^{R+r})$ 을 확률 변수  $\gamma^{R+r}$ 에 대해 적분함으로써 다음과 같이 표현된다.

$$P_{R+r} = \int_0^{\infty} f(\gamma^{R+r}) P_{R+r}(\gamma^{R+r}) d\gamma^{R+r} \quad (8)$$

여기서  $f(\gamma^{R+r})$ 는 확률 변수  $\gamma^{R+r}$ 의 확률밀도함수이다. 상기 식 (8)은  $r$ 번째 S-R 링크에 대한 평균 오류율 식을 의미한다. 그리고 식 (8)에서 변수  $R+r$ 을 '0'으로 치환할 때 즉,  $(P_{R+r})_{R+r=0} = P_0$ 는 S-D 링크의 평균 오류율 식이 된다.

### III. DSF-Relay MC-CDMA 시스템 성능분석

본 장에서는 DSF 릴레이 기법의 성능 분석을 위하여 릴레이 노드들에서의 오류 사건(error event)의 표현 기법을 우선 설명한다[5][6].

#### 1. 릴레이 노드에서의 오류 사건

그림 1과 같이  $R$ 개의 릴레이를 갖는 경우 릴레이 노드들에서 발생 가능한 총 오류 사건은  $2^R$  개이다. 릴레이 노드에서의 오류 사건에 기반한 분석을 위해  $p$ 번째 오류 사건 벡터  $E_p$ 를 다음으로 정의한다[5][6].

$$E_p = [e_p^1 \cdots e_p^r \cdots e_p^R] \quad (9)$$

여기서  $p \in \{1, 2, \dots, 2^R\}$ 이다.  $e_p^r$ 는  $p$ 번째 오류 사건의  $r$ 번째 릴레이의 복호 오류를 의미한다. 즉,  $e_p^r = 1$ 는 복호 과정에 오류가 발생한 경우를 나타내고  $e_p^r = 0$ 는 복호 과정에 오류가 없는 경우를 의미한다. 편의상  $E_p$ 에서  $E_1$ 은 모든 원소가 0인 벡터로  $E_{2^R}$ 은 모든 원소가 1인 벡터로 정의한다. 따라서  $E_{2^R}$ 은 모든 릴레이에서 오류를 감지하여 재전송하지 않는 경우가 된다.

DSF 기법에서  $r$ 번째 릴레이는 정보열이 정확히 수신된 경우에만 신호를 재전송하게 된다. 이때  $e_p^r = (e_p^r + 1) \bmod 2$ 는  $p$ 번째 오류 사건에서  $r$ 번째 릴레이의 재전송 변수가 된다. 따라서 재생성된 심벌은  $P_{R+r}$ 의 확률로  $\hat{b}_m^r = e_p^r b_m = 0$ 이거나  $1 - P_{R+r}$ 의 확률로  $\hat{b}_m^r = e_p^r b_m = b_m$ 의 값을 갖는다.

#### 2. R-D 링크 결합시 평균 오류율

$p$ 번째 오류 사건 벡터에 대해  $r$ 번째 R-D 링크에 대한 수신 신호 표현은 식 (3)과 유사하게 다음으로

표현된다.

$$y_i^{r,p} = e_p^r b_0 H_i^r c_{0,i} + \sum_{m=1}^{M-1} e_p^r b_m H_i^r c_{m,i} + n_i^r \quad (10)$$

따라서 이 경우의 순서 SNR은 다음과 같다.

$$\gamma_p^r = \overline{e_p^r} (\mu_0^r)^2 / \text{Var}[\eta_0^r] \quad (11)$$

그리고 모든 R-D 링크를 결합하면 순서 SNR은

$$\gamma_p^{RD} = \sum_{r=1}^R \gamma_p^r \text{이 되고 조건부 오류율 및 평균 오류율은 각각 다음과 같이 유도된다[10].}$$

$$P_p^{RD}(\gamma_p^{RD}) = P_p^{RD}(\{\gamma_p^r\}_{r=1}^R) = Q(\sqrt{2\gamma_p^{RD}}) \quad (12)$$

$$P_p^{RD} = \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty f(\gamma_p^1, \dots, \gamma_p^R) P_p^{RD}(\{\gamma_p^r\}) d\gamma_p^1 \cdots d\gamma_p^R \quad (13)$$

여기서  $f(\gamma_p^1, \dots, \gamma_p^R)$ 는 확률 변수  $\{\gamma_p^r\}_{r=1}^R$ 의 결합 확률밀도함수이다. 최종적으로 발생 가능한 모든 경우의 오류 사건들을 고려할 때 R-D 링크 결합시의 평균 오류율은 다음과 같이 유도된다[5][6].

$$P^{RD} = \sum_{p=1}^{2^R} \prod_{r=1}^R (1 - P_{R+r})^{\overline{e_p^r}} (P_{R+r})^{e_p^r} P_p^{RD} \quad (14)$$

상기 식을 통해 다음을 알 수 있다. 각 릴레이 노드에서 정확히 수신한 경우에만 해당 릴레이 노드는 재전송에 참여하게 되고 R-D 링크 결합에 따른 다이버시티 이득을 얻게 된다.

#### 3. R-D 링크 및 S-D 링크 결합시 평균 오류율

S-D 링크와 R-D 링크들의 수신 신호를 결합할 때,  $p$ 번째 오류 사건 벡터에 대한 결합 SNR은

$$\gamma_p^{TC} = \gamma_p^0 + \gamma_p^{RD} = \sum_{r=0}^R \gamma_p^r \text{이다. 여기서 } \gamma_p^0 = \gamma^0 \text{는 S-D 링크의 순서 SNR을 의미한다. 따라서 이에 대한 조건부 오류율 및 평균 오류율은 다음과 같다[10].}$$

$$P_p^{TC}(\gamma_p^{TC}) = P_p^{TC}(\{\gamma_p^r\}_{r=0}^R) = Q(\sqrt{2\gamma_p^{TC}}) \quad (15)$$

$$P_p^{TC} = \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty f(\gamma_p^0, \dots, \gamma_p^R) P_p^{TC}(\{\gamma_p^r\}) d\gamma_p^0 \cdots d\gamma_p^R \quad (16)$$

여기서  $f(\gamma_p^0, \dots, \gamma_p^R)$ 는 확률 변수  $\{\gamma_p^r\}_{r=0}^R$ 의 결합 확률밀도함수이다. 모든 경우의 오류 사건들을 고려할 때 최종적인 평균 오류율은 다음과 같다[5][6].

$$P^{TC} = \sum_{p=1}^{2^R} \prod_{r=0}^R (1 - P_{R+r}) \overline{c_p^r} (P_{R+r})^{c_p^r} P_p^{TC} \quad (17)$$

유도된 식 (8), (13) 및 (16)의 결과는 MCI(Monte Carlo Integral)를 통하여 얻을 수 있다[5][8-9].

#### IV. 모의실험 및 성능분석 결과 비교

본 장에서는 DSF 릴레이 MC-CDMA 시스템의 성능분석 결과를 모의실험 결과와 비교 분석한다. 모의 실험에서는 MC-CDMA 시스템의 변수로  $N=M=64$  및  $N/8$ 의 보호구간을 가정하였다. 확산코드로 Walsh-Hadamard 코드를 사용하였고 평균

SNR을  $SNR = E \left[ \sum_{l=0}^{L^r-1} |h_l^r|^2 \right] \frac{1}{\sigma^2/N}$  로 가정하였다.

또한 다중경로 페이딩 채널에 대한 평균 오류율의 성능분석 결과를 얻기 위한 MCI에서는 채널 이득

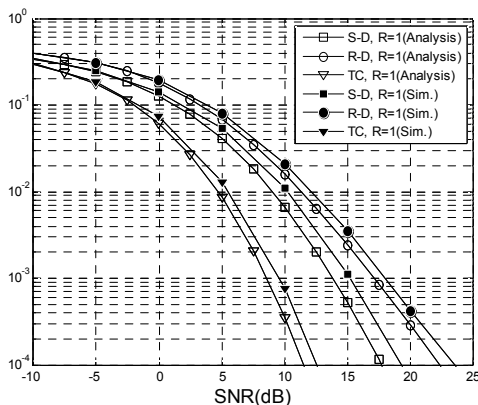


Fig. 2. Averaged BER versus SNR for DSF-Relay MC-CDMA system ( $R=1$ )

그림 2. DSF-Relay MC-CDMA 시스템의 SNR대 평균 BER 비교 ( $R=1$ )

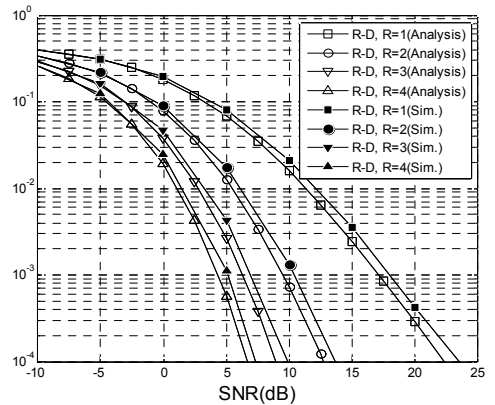


Fig. 3. R-D Link Averaged BER versus SNR for DSF relay systems with respect to different number of relay nodes ( $R \in \{1, 2, 3, 4\}$ ,  $L^0=4$ ,  $L^{R+r}=L^r=2$ )

그림 3. DSF-Relay MC-CDMA 시스템에서 릴레이 수에 따른 SNR대 R-D 링크 평균 BER ( $R \in \{1, 2, 3, 4\}$ ,  $L^0=4$ ,  $L^{R+r}=L^r=2$ )

$\{h_l^r\}_{r=0}^{2R}$ 을  $10^5$  번 발생시키고 각 조건부 오류율에 대한 평균을 취하였다.

그림 2-4에서는  $L^0=4$  및  $L^{R+r}=L^r=2$ 를 고려하였다. 그림 2는 DSF 릴레이 기법에 대한 각 링크의 평균 오류율 성능을 SNR에 따라 비교하고 있다. 그림으로부터 모든 링크에 대해 모의실험 결과와 의사 성능분석 결과가 유사함을 확인할 수 있다. 다만 높은 SNR에서는 성능분석 결과와 모의실험 결과 사이에 약간의 차이가 있음이 관찰된다. 이는 성능분석 결과에서 사용된 가우시안 근사화에 의한 일반적인 결과이며[9], 제안된 성능분석 결과가 시스템 오류율 성능에 대한 상한 값을 제시하고 있음을 알 수 있다. 또한 S-D 링크 성능이 R-D 링크 성능보다 우수하다. 이는 S-D 링크의 다중경로 수가 R-D 링크의 다중경로 수보다 크기 때문이다. 그리고 두 링크 신호를 결합함으로써  $10^{-2}$  BER에서 약 5dB SNR 이득을 얻게 됨을 확인할 수 있다.

그림 3과 4는 DSF 릴레이 기법을 적용한 MC-CDMA 시스템의 R-D 링크 결합 및 모든 링크 결합에 대한 평균 오류율 성능을 SNR 및 릴레이 개수  $R$ 의 변화에 따라 각각 비교한다. 그림 3과 4를 통해 DSF 릴레이 기법의 성능은  $R$ 의 증가에 따라 확

보되는 다이버시티 이득에 의해 평균 오류율 성능이 향상됨을 알 수 있다. 이러한 성능 향상 정도는  $R$ 의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 두 그림에서 관찰되는 성능 향상은 DSF 릴레이 기법에서  $R$ 의 증가가 사용되는 직교 채널 수  $R+1$ 의 증가를 의미하기 때문에 스펙트럼 효율 저하를 기반으로 언어짐에 유의하여야 한다. 또한 상대적으로 높은 SNR의 경우에 모의실험 결과와 성능분석 결과 사이에 약 1dB 이하의 SNR 차이를 보임을 확인할 수 있지만 대체로 또한 릴레이의 수  $R$ 이 증가되더라도 성능분석 결과가 모의실험 결과와 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 성능분석 방법을 통하여 DSF 릴레이 MC-CDMA 시스템이 획득 가능한 이론적 성능을 확인할 수 있음을 알 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 DSF 릴레이 MC-CDMA 시스템의 다중경로 레일리 페이딩 채널에 대한 평균 오류율 성능분석 기법을 제안하고 그 정확성을 모의실험 결과와의 비교를 통하여 검증하였다. DSF 릴레이 기법에서는 릴레이 개수 증가에 따른 다이버시티 이득의 획득을 통한 성능향상을 얻을 수 있으며 제안된 분석

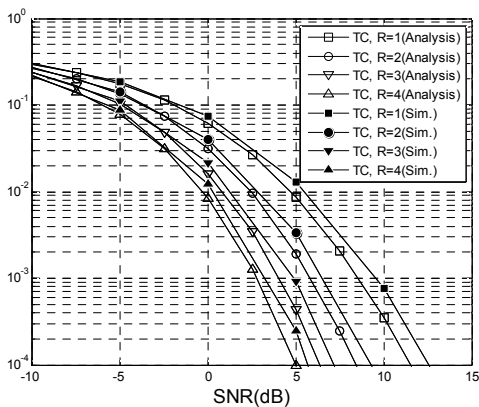


Fig. 4. Total Link Averaged BER versus SNR for DSF relay systems with respect to different number of relay nodes ( $R \in \{1, 2, 3, 4\}$ ,  $L^0 = 4$ ,  $L^{R+r} = L^r = 2$ )

그림 4. DSF-Relay MC-CDMA 시스템에서 릴레이 수에 따른 SNR대 전체 링크 평균 BER ( $R \in \{1, 2, 3, 4\}$ ,  $L^0 = 4$ ,  $L^{R+r} = L^r = 2$ )

기법을 통해 시스템이 얻을 수 있는 성능의 상한을 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "End-to-End Performance of Transmission Systems with Relays Over Rayleigh-Fading Channels," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, Nov. 2003.
- [2] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "Harmonic Mean and End-to-End Performance of Transmission Systems With Relays," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 52, no. 1, pp. 130-135, Jan. 2004.
- [3] Jemin Lee, Sungsoo Park, Hano Wang, and Daesik Hong, "QoS-guaranteed Transmission Scheme Selection for OFDMA Multi-hop Cellular Networks", *IEEE ICC'07*, pp. 4587 - 4591, 24-28 June 2007.
- [4] 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, pp. 2415-2425, Nov. 2003.
- [5] 고균병, 서정태, "복호 후 전달 릴레이 시스템의 평균 오류율에 대한 릴레이 노드에서의 오류 사건 기반의 의사-분석 기법," *전기전자학회논문지*, 15권 1호, pp. 64-69, 2011년 3월.
- [6] Jeanyung Jang and Kyunbyoung Ko, "Exact & closed-form BER expressions based on Error-Events at Relay nodes for DF Relay Systems over Rayleigh Fading channels," *IEICE Trans. on Comm.*, Vol.E94-B, No.08, pp.2419-2422, Aug. 2011.
- [7] 고균병, 우중재, "MC-CDMA 시스템에 대한 주파수 효율적인 CDD-DF-Relay 기법에 관한 연구," *전자공학회논문지*, 제48권, TC편, 제5호, pp. 01-07, 2011년 5월.
- [8] 고균병, 우중재, "비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템에서의 잔류 주파수 율셋 영향 분석," *전자공학회논문지*, 제47권, TC편, 제8호, pp. 9-15, 2010년 8월.
- [9] 고균병, 서정태, "다중경로 간섭제거기법을 적용한

다중코드 CDMA 시스템 성능 분석에서의 부가적  
가우시안 근사화에 의한 영향 분석”, *대한전자공학회*, 제45권 TC편 제8호, 2008년, pp. 75-81.

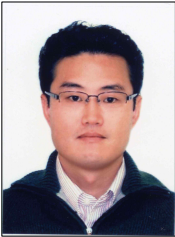
[10] John G. Proakis, *Digital Communications*. New York: Gaw-Hill, 1995.

---

## 저 자 소 개

---

### 고 균 병 (정회원)



1997년 : 연세대학교 전자공학과  
졸업 (공학사)  
1999년 : 연세대학교 대학원 전기  
전자공학과 (공학석사)  
2004년 : 연세대학교 대학원 전기  
전자공학과 (공학박사)  
2004년 03월~ 2006년 02월 :  
삼성전자 통신연구소, 책임연구원  
2007년 03월~현재 : 국립한국교통대학교 제어계측  
공학과, 부교수

<주관심분야> Multi-Antenna & Multi-Carrier  
System, Cooperative Network,  
통신신호처리