

논문 2012-49-9-1

# CDD-DSF 릴레이 기법을 적용한 MC-CDMA 시스템의 다중경로 레일리 페이딩 채널에 대한 평균 비트 오류율 분석

( Averaged BER Performance Analysis of CDD-DSF-Relay schemes for  
MC-CDMA Systems over Multipath Rayleigh Fading Channles )

고 균 병\*, 서 정 태\*\*

( Kyun-Byoung Ko and Jeong-Tae Seo )

## 요 약

본 논문에서는 CDD-DSF 릴레이 기법을 적용한 MC-CDMA 시스템을 다중경로 레일리 페이딩 채널에 대해 제안한다. 일반적인 DSF 기법들과는 다르게 CDD 방법의 적용시 각 릴레이는 하나의 채널을 통하여 신호를 전송한다. 따라서 릴레이들과 수신단 사이의 채널들은 넓게 시간 확산된 하나의 채널로 간주된다. 그리고 릴레이 네트워크의 협력 다이버시티는 제안된 CDD 기법의 MC-CDMA 시스템에서 주파수 다이버시티로 획득된다. 또한 CDD-DSF 릴레이 기법에 대한 평균 오류율을 의사 분석기법을 통하여 제시한다. 성능분석 및 모의실험 결과를 통하여 제안된 CDD-DSF 기법이 주파수 효율 저하 없이 협력 다이버시티를 획득할 수 있음을 확인한다.

## Abstract

In this paper, CDD(Cyclic Delay Diversity)-DSF(decode-and-selectively forward) relay schemes are proposed for MC-CDMA(multicarrier-code division multiple access) systems over multipath Rayleigh fading channels. On the contrary to general DSF schemes, each relay equipped a CDD method can transmit on single channel. Therefore, all link channels between destination and relays can be considered as a single channel which is widely delay spread. The cooperative diversity of relay networks can be obtained as the frequency diversity for MC-CDMA systems with proposed CDD schemes. Furthermore, a semi-analytical approach for the averaged bit error rate(BER) performance evaluation is proposed for the proposed CDD-DSF-Relay schemes. By simulation and numerical results, it is confirmed that the proposed one can be a possible solution to achieve cooperative diversity gain without a reduction of spectral efficiency.

**Keywords** : CDD, DSF-Relay, MC-CDMA, multipath Rayleigh fading channels, BER

## I. 서 론

효율적으로 페이딩 채널의 영향을 극복하기 위한 방법으로 협력 다이버시티 기법이 제안되었으며 그에 관한 연구가 널리 수행되고 있다<sup>[1~6]</sup>. 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 Relay가 Source로부터 수

\* 평생회원, \*\* 정회원-교신저자, 한국교통대학교 제어계측공학과

(Control and Instrumentation Engineering at Korea National University of Transportation)

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

※ “이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.”

접수일자: 2012년5월29일, 수정완료일: 2012년9월19일

신한 신호를 복호 후 재생성하여 전송하는 방식으로 복 잡도가 크지만 Relay가 복호에 성공한 경우에만 재전송 하는 DSF(Decoded and Selective Forward)의 경우 AF 에 비하여 향상된 성능을 나타낸다<sup>[3]</sup>.

기존의 DSF-Relay 기법의 가장 큰 단점은 직교 채널을 통한 전송으로 야기되는 주파수 효율(Spectral Efficiency) 저하이다. 따라서 이를 해결하기 위한 연구 들이 진행되고 있는 상황이다<sup>[3-4]</sup>.

이와 병행하여 순환 지연 다이버시티(Cyclic Delay Diversity: CDD)에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다<sup>[7-9]</sup>. 지연 다이버시티(Delay Diversity)이라고 불리는 간단한 전송 안테나 기법은 1993년 Wittneben에 의해 제안되었다<sup>[7][8]</sup>. 그리고 Kaiser는 기법을 OFDM 시스템에 적용하여 저복잡도의 전송 다이버시티 기법이 OFDM 시스템의 주파수 축에 적용 가능함을 보였다<sup>[7][8]</sup>. 참고문헌 [9]에서는 이러한 CDD 기법이 CDD-DF Relay 형태로 MC-CDMA 시스템에 적용 가능함을 보였다. 하지만 참고문헌 [9]에서는 DF 기법에 대한 모의 실험 결과만을 제시하였으며 성능분석 방법을 제시하지는 못하였다.

본 논문에서는 DF 릴레이 보다 우수한 성능을 갖는 DSF 릴레이에 CDD 기법을 적용하고 이에 대한 평균 오류율 성능분석 방법을 MC-CDMA 시스템에 대해 제시하도록 한다. 즉, CDD-DSF 릴레이 기법에 오류 사건 기반의 성능분석 방법<sup>[5-6]</sup>을 적용하여 MC-CDMA 시스템의 다중경로 레일리 페이딩 채널에 대한 평균 오류율 성능을 의사 성능분석 기법<sup>[5, 10]</sup>으로 제안하고 그 성능을 모의실험을 통하여 검증하도록 한다. 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 MC-CDMA DSF-Relay 시스템 모델을 설명한다. III장에서는 MC-CDMA CDD-DSF-Relay 시스템에 대한 평균 오류율 성능을 분석한다. IV장에서는 제안된 성능분석 결과를 모의실험 결과와 비교 분석하며 V장에서 결론을 맺는다.

## II. MC-CDMA DSF-Relay 시스템

MC-CDMA DSF 릴레이 시스템에서는 그림 1과 같이 S(Source) 노드에서 MC-CDMA 심벌을 전송한다. 그리고 Relay(R) 노드들에서는 수신된 신호를 복조한 후 정확히 복조한 경우에만 재생성된 신호를 각각 직교 채널들을 통하여 재전송한다. 따라서 D(Destination) 노

드에서는 신호의 간섭 없이 수신된 신호를 결합함으로써 다이버시티 이득을 얻게 된다.

### 1. MC-CDMA 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 이산 시간 신호는 다음과 같이 표현된다<sup>[9, 11-12]</sup>.

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

여기서  $t \in \{0, 1, \dots, N-1\}$  이고  $b_m = \pm 1$  는  $m$  번째 확산 코드의 BPSK 심벌,  $|c_{m,n}| = 1$  는  $m$  번째 확산코드의  $n$  번째 부반송파 코드를 나타낸다.  $N$  은 확산코드의 길이,  $M$  은 확산코드의 개수를 각각 의미한다. 이러한 시간영역 신호에 Cyclic Prefix 형태의 보호구간이 삽입된다. 그리고 DAC(Digital to Analog Conversion) 과정을 거쳐 안테나를 통해 전송된다. 전송 신호는 각 링크의 다중경로 페이딩 채널을 통과한 후 가산성 백색 잡음(Additive White Gaussian Noise: AWGN)이 더해져 수신된다.

본 논문에서는 모든 링크에 대해 의사 정적 다중경로 레일리 페이딩 채널을 가정한다<sup>[13]</sup>. 따라서  $r$  번째 링크의 다중 경로수가  $L^r$  이면  $l$  번째 경로의 채널은  $h_l^r (l=0, 1, \dots, L^r-1)$  로 표현한다. 여기서  $h_l^r$  의 크기는 레일리 분포를 갖고 위상은  $[0, 2\pi)$  동안에 균일하게 분포하며 각 경로와 링크들 간에 상호 독립적인 랜덤 변수들로 가정한다. 그리고 다중경로 성분들의 정규화된

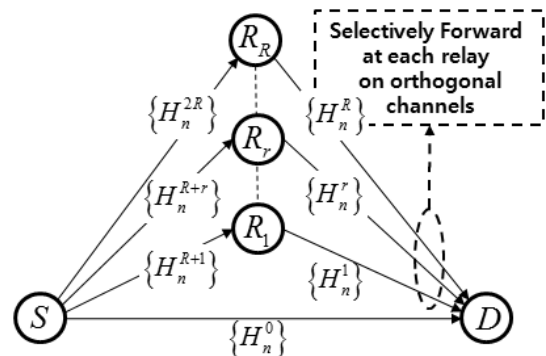


그림 1. MC-CDMA 시스템의 일반적인 DSF-Relay 기법  
Fig. 1. General DSF-Relay scheme for MC-CDMA system.

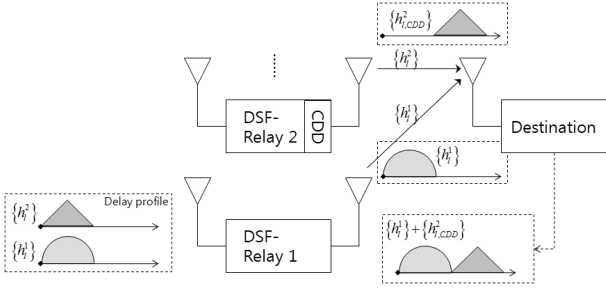


그림 2. CDD-DSF-Relay 기법의 블록도  
Fig. 2. Block diagram of CDD-DSF-Relay scheme.

탭 간격을  $1/N$ 라고 할 때,  $r$ 번째 링크의  $n$ 번째 부반송파의 채널 응답은 다음과 같다<sup>[9, 11~12]</sup>.

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

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. 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.

MC-CDMA 시스템의 수신기 동작은 다음과 같다. 수신 신호를 A/D 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 신호의 표현은 다음과 같다.

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

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 수신신호를 의미한다. 잡음 성분의 평균은  $E[n_i^r] = 0$ 이고 분산은  $E[|n_i^r|^2] = \sigma^2$ 이다.

## 2. S-D 및 S-R 링크의 평균 비트 오류율

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

드에 대한 결합 계수는 다음과 같다<sup>[9]</sup>.

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

따라서  $r$ 번째 S-R 링크에 대한 결정변수는 다음과 같다.

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

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

$$\eta_0^{R+r} = \sum_{i=1}^{N-1} \left( \sum_{m=1}^{M-1} b_m H_i^{R+r} c_{m,i} + n_i^{R+r} \right) w_{0,i}^{R+r}$$
 이 다 .

가우시안 근사화와  $N=M$ 을 가정할 때,  $E[\eta_0^{R+r}] = 0$  이고  $Var[\eta_0^{R+r}] = \mu_0^{R+r} - (\mu_0^{R+r})^2$ 이다. 따라서 순시 SNR은  $\gamma^{R+r} = (\mu_0^{R+r})^2 / Var[\eta_0^{R+r}]$  이고 조건부 오류율은 다음과 같다<sup>[13]</sup>.

$$P_{R+r}(\gamma^{R+r}) = Q(\sqrt{2\gamma^{R+r}}) \quad (6)$$

여기서  $Q(\sqrt{2x}) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{\sqrt{2x}}^{\infty} \exp(-t^2/2) dt$  이다 <sup>[13]</sup>. 평균 오류율은 조건부 오류율  $P_{R+r}(\gamma^{R+r})$ 을 확률 변수  $\gamma^{R+r}$ 에 대해 적분함으로써 다음과 같이 표현된다.

$$P_{R+r} = \int_0^{\infty} f(\gamma^{R+r}) P_{R+r}(\gamma^{R+r}) d\gamma^{R+r} \quad (7)$$

여기서  $f(\gamma^{R+r})$ 는 확률 변수  $\gamma^{R+r}$ 의 확률밀도함수이다. 식 (7)은  $r$ 번째 S-R 링크에 대한 평균 오류율을 의미한다. 또한 식 (7)에서  $R+r=0$ 을 대입할 때  $P_0$ 는 S-D 링크에 대한 평균 오류율을 의미한다.

## III. MC-CDMA CDD-DSF-Relay 시스템

일반적인 DSF 릴레이 시스템의 가장 큰 단점은 릴레이 노드들이 직교하는 채널들을 할당받아 전송함으로써 인한 주파수 효율의 저하이다<sup>[1-6]</sup>. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 CDD-DSF-Relay 시스템을 제안하고 그 평균 오류율 성능을 분석하도록 한다. 그림 2와 같이 CDD-DSF-Relay 시스템에서는 모든 릴레이 노드들이 동일한 채널을 통하여 전송하면

서도 다이버시티 이득을 얻도록 하기 위하여 미리 할당된 지연 값으로 Cyclic Delay를 적용하여 재생성된 MC-CDMA 심벌을 전송한다. 따라서 최종 수신단에서는 그림과 같이 채널 탭 수가 길어진 효과를 얻게 된다. 즉, 다중경로 수 증가에 따른 주파수 다이버시티 효과를 얻을 수 있다<sup>[9]</sup>.

### 1. S-D 링크 오류 사건

본 절에서는 성능 분석을 위해 릴레이 노드들에서의 오류 사건(error event)의 표현 기법을 우선 설명한다<sup>[5-6]</sup>. 즉, 릴레이 노드들에서의 S-D 링크 오류 사건에 기반한 분석을 위해  $p$ 번째 오류 사건 벡터  $E_p$ 를 다음으로 정의한다.

$$E_p = [e_p^1 \cdots e_p^r \cdots e_p^R] \quad (8)$$

여기서  $p \in \{1, 2, \dots, 2^R\}$  이고  $e_p^r$ 는  $p$ 번째 오류 사건에서  $r$ 번째 릴레이의 복호 오류 유무를 의미한다.  $e_p^r = 1$ 은 복호 과정에 오류가 발생한 경우를 나타내고  $e_p^r = 0$ 는  $r$ 번째 릴레이가 신호를 정확히 수신한 경우를 의미한다. 편의상 벡터  $E_p$ 를 다음의 형태로 정의한다.  $E_1$ 은 모든 원소가 0인 벡터(모든 릴레이가 오류 없이 신호를 정확히 수신한 경우)로  $E_{2^r}$ 은 모든 원소가 1인 벡터(모든 릴레이에서 오류를 감지하여 재전송하지 않는 경우)로 정의한다. DSF 기법에서  $r$ 번째 릴레이는  $e_p^r = 0$ 인 경우에만 신호를 재전송하게 되므로  $\overline{e_p^r} = (e_p^r + 1) \bmod 2$ 는  $p$ 번째 오류사건에서  $r$ 번째 릴레이의 재전송을 나타내는 변수가 된다. 따라서 재생성된 심벌은  $P_{R+r}$ 의 확률로  $\widehat{b}_m^r = \overline{e_p^r} b_m = 0$ 이거나  $1 - P_{R+r}$ 의 확률로  $\widehat{b}_m^r = e_p^r b_m = b_m$ 의 값을 갖는다.

### 2. CDD-DSF-Relay 기법의 R-D 링크 신호모델

제안된 CDD-DSF-Relay 시스템에서  $r$ 번째 릴레이는 미리 할당된 시간 지연값  $D^r$ 을 이용해 시간축에서 Cyclic Delay시켜 MC-CDMA 심벌을 생성하여 전송한다. 그리고 보호구간의 길이가 CDD 적용 후 채널의 Delay spread의 영향을 극복할 수 있도록 충분히 길다고 가정한다. 따라서  $r$ 번째 R-D 링크에 대한 주파수축 채널 이득을 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[11-13]</sup>.

$$H_{n,CDD}^r = \sum_{l=D^r}^{L^r-1+D^r} h_l^r \exp(-j2\pi nl/N) \quad (9)$$

따라서  $p$ 번째 오류사건 벡터에 대해 R-D 링크의 단일 채널을 통해 수신된 신호는 각 R-D 링크들의 채널 이득의 합으로 표현된다. 즉  $i$ 번째 부반송파 이산 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_{i,CDD}^p &= \sum_{m=0}^{M-1} b_m \sum_{r=1}^R \overline{e_p^r} H_{i,CDD}^r c_{m,i} + n_i^1 \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} b_m H_{i,CDD}^p c_{m,i} + n_i^1 \end{aligned} \quad (10)$$

이것서  $H_{i,CDD}^p = \sum_{r=1}^R \overline{e_p^r} H_{i,CDD}^r$  이고 상기 식을 통해 다음을 알 수 있다. 제안된 CDD-DSF-Relay 기법을 사용함으로써 각 릴레이들은 동일 채널을 통하여 재생성된 신호를 전송하게 된다. 또한 각 릴레이에서 복호 오류가 없는 경우 즉,  $e_p^r = 0$ ( $\overline{e_p^r} = 1$ )인 경우 채널의 탭 수가 길어지는 효과를 야기하며 이는 수신단에서 주파수 다이버시티 이득으로 관찰될 것이다.

### 3. R-D 링크 결합의 평균 오류율

제안된 기법에서  $p$ 번째 오류사건 벡터에 대한 결합 계수는 식 (4)의  $H_i^r$ 을  $H_{i,CDD}^p = \sum_{r=1}^R \overline{e_p^r} H_{i,CDD}^r$ 로 대체함으로써 다음같이 표현된다.

$$w_{0,i}^{p,CDD} = (w_{0,i}^r)_{H_i^r = H_{i,CDD}^p} \quad (11)$$

따라서 R-D 링크에 대한 결정변수는 다음과 같다.

$$v_{0,CDD}^{p,RD} = \sum_{i=0}^{N-1} y_{i,CDD}^p w_{0,i}^{p,CDD} = \mu_{p,CDD}^1 b_0 + \eta_{p,CDD}^1 \quad (12)$$

여기서  $\mu_{p,CDD}^1 = (\mu_0^{R+r})_{H_i^{R+r} = H_{i,CDD}^p}$ ,  $E[\eta_{p,CDD}^1] = 0$  이고  $Var[\eta_{p,CDD}^1] = (Var[\eta_0^{R+r}])_{H_i^{R+r} = H_{i,CDD}^p}$  이다. 따라서 순시 SNR은  $\gamma_{p,CDD}^1 = (\mu_{p,CDD}^1)^2 / Var[\eta_{p,CDD}^1]$ 이 되고 조건부 오류율 및 평균 오류율은 다음과 같다.

$$P_{p,CDD}^{RD}(\gamma_{p,CDD}^1) = Q(\sqrt{2\gamma_{p,CDD}^1}) \quad (13)$$

$$P_{p,CDD}^{RD} = \int_0^{\infty} f(\gamma_{p,CDD}^1) P_{p,CDD}^{RD}(\gamma_{p,CDD}^1) d\gamma_{p,CDD}^1 \quad (14)$$

여기서  $f(\gamma_{p,CDD}^1)$ 는 확률 변수  $\gamma_{p,CDD}^1$ 의 확률밀도함수이다. 최종적인 평균 오류율 유도를 위해서는 발생 가능한 모든 오류 사건을 고려해야만 한다. 식 (8)의  $p$ 번째 오류 사건이 발생할 확률은 S-R 링크의 평균 오류율식 (7)을 통해  $\prod_{r=1}^R (1 - P_{R+r}) \overline{e_p^r} (P_{R+r})^{e_p^r}$ 로 표현할 수 있다. 따라서 발생 가능한 모든 경우의 오류 사건들을 고려할 때 R-D의 평균 오류율을 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[3, 5-6]</sup>.

$$P_{p,CDD}^{RD} = \sum_{p=1}^{2^R} \prod_{r=1}^R (1 - P_{R+r}) \overline{e_p^r} (P_{R+r})^{e_p^r} P_{p,CDD}^{RD} \quad (15)$$

#### 4. R-D 및 S-D 링크 결합의 평균 오류율

S-D 링크와 R-D 링크들 수신 신호를 결합할 때,  $p$ 번째 오류 사건에 대한 결합 SNR은  $\gamma_{p,CDD}^{TC} = \gamma_{p,CDD}^0 + \gamma_{p,CDD}^1$  이고  $\gamma_{p,CDD}^0 = \gamma^0$ 는 S-D 링크의 순시 SNR을 의미한다. 따라서 조건부 오류율을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{p,CDD}^{TC}(\gamma_{p,CDD}^{TC}) = Q(\sqrt{2\gamma_{p,CDD}^{TC}}) \quad (16)$$

$$P_{p,CDD}^{TC} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(\gamma_{p,CDD}^0, \gamma_{p,CDD}^1) P_{p,CDD}^{TC}(\{\gamma_{p,CDD}^1\}) d\gamma_{p,CDD}^0 d\gamma_{p,CDD}^1 \quad (17)$$

여기서  $f(\gamma_{p,CDD}^0, \gamma_{p,CDD}^1)$ 는 확률 변수  $\{\gamma_{p,CDD}^r\}_{r=0}^1$ 의 결합 확률밀도함수이다. 최종적인 평균 오류율 식은 식 (15)와 유사하게 발생 가능한 오류 사건들을 모두 고려함으로써 다음과 같이 유도된다.

$$P_{p,CDD}^{TC} = \sum_{p=1}^{2^R} \prod_{r=1}^R (1 - P_{R+r}) \overline{e_p^r} (P_{R+r})^{e_p^r} P_{p,CDD}^{TC} \quad (18)$$

유도된 평균 오류율 식 (15) 및 (18)의 결과를 얻기 위해서는 식 (7), (14) 및 (17)의 결과가 필요하며 이들 결과는 MCI(Monte Carlo Integral)를 통하여 얻을 수 있다<sup>[5, 10]</sup>.

## IV. 성능분석 및 모의실험 결과

본 장에서는 제안된 CDD-DSF-Relay 기법을 적용한 MC-CDMA 시스템의 성능분석 결과를 모의실험 결과와 비교 분석하여 그 정확성을 검증하도록 한다. 모의 실험에서는 MC-CDMA 시스템의 변수로  $N=64$ ,  $M=64$  및  $N_G = N/8$ 의 보호구간을 가정하였다. 확산코드로는 Walsh-Hadamard 코드를 사용하였고 평균 SNR을  $SNR = E\left[\sum_{l=0}^{L^r-1} |h_l|^2\right] / (\sigma^2/N)$ 로 가정하였다. 다중경로 레일리 페이딩 채널에서의 평균 오류율 성능 분석 결과를 얻기 위해서는 채널 이득  $\{h_l\}_{r=0}^{2R}$ 을  $10^5$ 번 발생시키고 각 조건부 오류율 식 (6), (13) 및 (16)에 대한 평균을 취하여 평균 오류율 식 (7), (14) 및 (17)을 각각 구하였다.

그림 3은 제안된 CDD-DSF-Relay 기법의 R-D 링크 결합에 대한 평균 오류율 성능을 SNR 및 Relay 개수  $R$ 의 변화에 따라 비교한다. 그림 4에서는 R-D 링크 및 S-D 링크 결합 즉, 전체 링크 결합에 대한 평균 오류율 성능을 동일 조건에서 비교한다. 그림 3과 4에서는  $L^0 = 4$ ,  $L^{R+r} = L^r = 2$  및  $D^r = (r-1)L^r$ 를 고려하였다. 두 그림에서는 성능분석 결과와 모의실험 결과를 함께 비교함으로써 분석결과의 정확성을 검증한다. 전반적으로 성능분석 결과는 모의실험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 다만 높은 SNR에서 성능분석 결과와 모의실험 결과 사이에 차이가 나타나고 있다. 이는 성능분석 결과에서 사용된 가우시안 근사화에 의한 일반적인 결과이며 제안된 성능분석 결과가 평균 오류율에 대한 한계 성능을 제시하고 있음을 알 수 있다. 그림 3과 4를 통해 일반적인 DSF-Relay 시스템과는 다르게 제안된 CDD-DSF-Relay 기법이 릴레이 수  $R$ 이 증가되더라도 R-D 링크들이 단일 채널만을 사용하여 다이버시티 이득을 얻고 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 기법이 일반적인 DSF-Relay 시스템의 단점인 스펙트럼 효율 저하를 극복할 수 있음을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 제안된 CDD-DSF-Relay 기법에서  $R$ 의 증가에 따른 다중경로 수 증가는 주파수 다이버시티의 증가로 이어지고 이에 따른 성능향상을 관찰할 수 있다.

그림 5와 6에서는  $L^0 = L^{R+r} = L^r = 4$  및

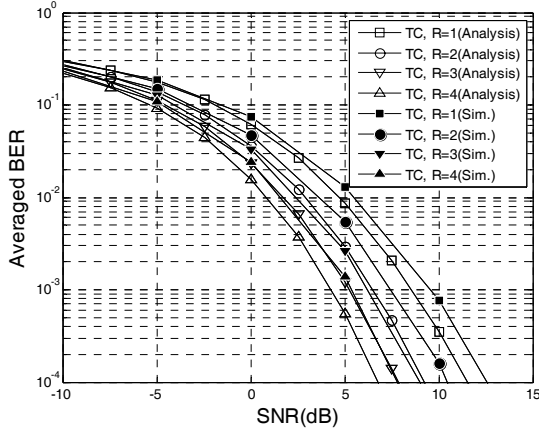


그림 4. 제안된 CDD-DSF-Relay 시스템의 다양한 Relay 개수에 대한 SNR 변화에 따른 전체 링크 결합 평균 오류율 ( $L^0=4$ ,  $L^{R+r}=L^r=2$ ,  $D^r=(r-1)L^r$ )

Fig. 4. Averaged BER of total link combining versus SNR with respect to different number of Relays for proposed CDD-DSF-Relay schemes ( $L^0=4$ ,  $L^{R+r}=L^r=2$ ,  $D^r=(r-1)L^r$ ).

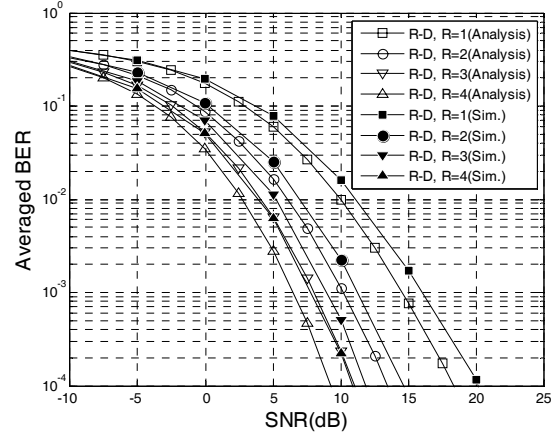


그림 5. 제안된 CDD-DSF-Relay 기법의 다양한 Relay 개수에 대한 SNR 변화에 따른 R-D 링크 결합 평균 오류율 ( $L^0=L^{R+r}=L^r=4$ ,  $D^r=(r-1)3 \bmod N_G$ )

Fig. 5. Averaged BER of R-D link combining versus SNR with respect to different number of Relays for proposed CDD-DSF-Relay schemes ( $L^0=L^{R+r}=L^r=4$ ,  $D^r=(r-1)3 \bmod N_G$ ).

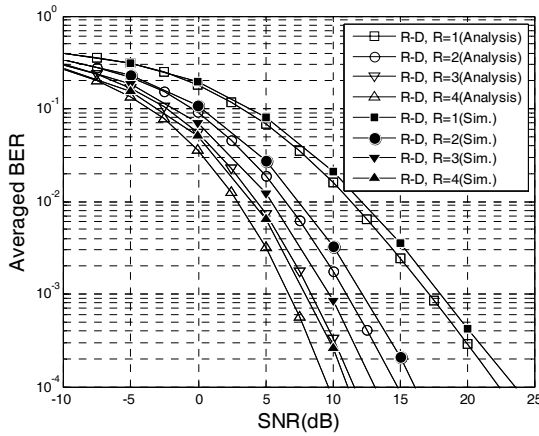


그림 3. 제안된 CDD-DSF-Relay 기법의 다양한 Relay 개수에 대한 SNR 변화에 따른 R-D 링크 결합 평균 오류율 ( $L^0=4$ ,  $L^{R+r}=L^r=2$ ,  $D^r=(r-1)L^r$ )

Fig. 3. Averaged BER of R-D link combining versus SNR with respect to different number of Relays for proposed CDD-DSF-Relay schemes ( $L^0=4$ ,  $L^{R+r}=L^r=2$ ,  $D^r=(r-1)L^r$ ).

$D^r=(r-1)3 \bmod N_G$ 를 고려한다. 즉, 모든 링크의 다중경로수가 4인 경우를 나타낸다. 이 경우는 S-R 및 R-D 링크의 다중경로 수 증가를 의미하므로 그림 3과 4를 비교할 때, 다중경로 수 증가에 따른 다이버시티

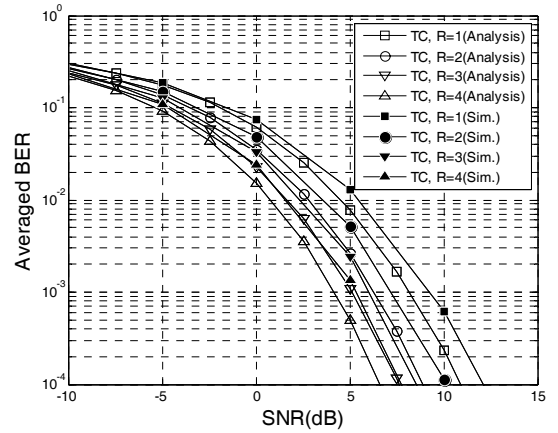


그림 6. 제안된 CDD-DSF-Relay 시스템의 다양한 Relay 개수에 대한 SNR 변화에 따른 전체 링크 결합 평균 오류율 ( $L^0=L^{R+r}=L^r=4$ ,  $D^r=(r-1)3 \bmod N_G$ )

Fig. 6. Averaged BER of total link combining versus SNR with respect to different number of Relays for proposed CDD-DSF-Relay schemes ( $L^0=L^{R+r}=L^r=4$ ,  $D^r=(r-1)3 \bmod N_G$ ).

이득이 커짐을 확인할 수 있다. 또한 이 경우는 상대적으로 채널의 Delay Spread가 큰 경우를 의미한다고 할 수 있다. 따라서 CDD의 적용시 전체 채널의 Delay Spread가 보호구간의 길이 보다 커질 수 있다. 따라서

본 논문에서는 CDD 값을  $D^r = (r-1)3 \bmod N_G$  로 할당하여 Relay 개수  $R$ 이 증가되더라도 R-D 링크의 전체 Delay Spread가 보호구간 안에 존재하도록 하였다.

이는 각 R-D 링크 채널의 Delay Profile이 겹치게 됨을 의미한다. 따라서  $R=4$ 에 대한 그림 3과 5(혹은 그림 4와 6)의 성능 비교를 통해 알 수 있듯이 완전한 다이버시티 이득을 얻지 못함을 알 수 있다. 하지만  $R$ 이 1이상으로 커지더라도 제안된 CDD 기법을 통하여 주파수 효율 저하 없이 다양한 페이딩 채널 조건에서 평균 오류율 향상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 MC-CDMA 시스템에 대한 CDD-DSF 릴레이 기법을 제안하였다. 일반적인 DSF 릴레이 기법에서는 릴레이 개수가 증가됨에 따라 필요한 직교 채널 수가 증가되는 반면에, 제안된 CDD-DSF 릴레이 기법에서는 릴레이 개수 증가에 상관없이 제안된 R-D 링크에 대해 하나의 채널만을 사용한다. 따라서 릴레이 증가에 따른 주파수 효율의 저하 없이 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 제안된 기법에 대한 성능분석 방법을 제시하였으며 모의실험 결과와의 비교를 통하여 제안된 기법의 정확성을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

[1] 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. 3063-3080, Dec. 2004.

[2] T. Wang, A. Cano, G. B. Giannakis, and J. N. Laneman, "High-Performance Cooperative Demodulation With Decode-and-Forward Relays," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 55, no. 7, pp. 1427-1438, July. 2007.

[3] 고균병, 서정태, "레일리 페이딩 채널에서의 OADF 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능분석 기법에 관한 연구," *한국신호처리시스템학회논문지*, 12권, 3호, pp.188-193, 2011년 7월.

[4] 고균병, 서정태, 김학원, "레일리 페이딩 채널에서의 OAF 릴레이 시스템에 대한 집합 연산 기반의 분석 기법에 관한 연구," *전기전자학회논문지*, 15

권 3호, pp. 198-204, 2011년 9월.

[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] S. Kaiser, "Spatial transmit diversity techniques for broadband OFDM systems," in *Proceedings IEEE GLOBECOM 2000*, San Francisco, USA, Nov. 2000, pp. 1824-1828.

[8] S. Plass, A. Dammann, and S. Sand, "An Overview of Cyclic Delay Diversity and its Applications," in *Proceedings IEEE VTC 2008*, pp. 1-5, 21-24 Sept. 2008.

[9] 고균병, 우중재, "MC-CDMA 시스템에 대한 주파수 효율적인 CDD-DF-Relay 기법에 관한 연구," *전자공학회논문지*, 제48권, TC편, 제5호, pp. 01-07, 2011년 5월.

[10] 고균병, 서정태, "다중경로 간섭제거기법을 적용한 다중코드 CDMA 시스템 성능 분석에서의 부가적 가우시안 근사화에 의한 영향 분석," *전자공학회논문지*, 제45권 TC편, 제8호, pp. 75-81, 2008년.

[11] 고균병, 우중재, "비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템에서의 시간 오프셋 영향 분석," *전자공학회논문지*, 제47권, TC편, 제8호, pp. 1-8, 2010년 8월.

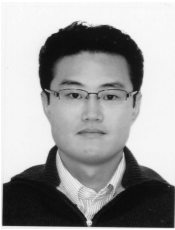
[12] 고균병, 우중재, "비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템에서의 잔류 주파수 오프셋 영향 분석," *전자공학회논문지*, 제47권, TC편, 제8호, pp. 9-15, 2010년 8월.

[13] John G. Proakis, *Digital Communication*. McGraw Hill, 1995.

---

 저 자 소 개
 

---



고 균 병(평생회원)

1997년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.

1999년 연세대학교 전기전자공학 석사 졸업.

2004년 연세대학교 전기전자공학 박사 졸업.

2004년 3월~2007년 2월 삼성전자 통신연구소

2007년 3월~현재 국립한국교통대학교 제어계측 공학과

<주관심분야 : 이동통신, MIMO, 적응신호처리>



서 정 태(정회원)

1985년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.

1987년 연세대학교 전자공학 석사 졸업.

1995년 연세대학교 전자공학 박사 졸업.

1988년~1990년 삼성전자 주임연구원

1995년~현재 국립한국교통대학교 제어계측공학과

<주관심분야 : 이동통신, 신호처리>