

논문 2011-48TC-5-1

MC-CDMA 시스템에 대한 주파수 효율적인 CDD-DF-Relay 기법에 관한 연구

(Frequency Efficient CDD-DF-Relay schemes for MC-CDMA Systems)

고 균 병*, 우 중 재**

(Kyun-Byoung Ko and Choong-Chae Woo)

요 약

본 논문에서는 CDD-DF-Relay 기법을 MC-CDMA 시스템에 대해 제안하고 제안된 기법의 성능을 다중경로 레일리 페이딩 채널에서 검증한다. 일반적인 DF-Relay 기법에서는 모든 Relay들이 직교 채널들로 신호를 전송하여야 하기 때문에 그 장점 즉, 다이버시티 이득은 주파수 효율의 저하로부터 얻어진다고 할 수 있다. 따라서 이러한 주파수 효율 저하의 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 CDD 기법을 각 Relay 노드에 적용하여 모든 Relay가 하나의 채널만을 사용하도록 한다. 이는 Destination에서 바라본 하나의 R-D 링크 채널의 Delay Spread가 길어지는 효과를 갖는다. 즉 Relay 개수의 증가에 따라 다중 경로수가 증가됨을 의미하고, 이는 MC-CDMA 시스템에서 주파수 다이버시티 이득으로 해결될 수 있다. 모의실험에서는 일반적인 DF-Relay 기법과 제안된 CDD-DF-Relay 기법의 성능을 비교 분석한다. 이를 통해 제안된 기법이 주파수 효율의 저하 없이 협력 다이버시티 이득을 획득할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, CDD(Cyclic Delay Diversity)-DF(Decode-and-Forward)-Relay scheme is proposed for MC-CDMA(Multicarrier-Code Division Multiple Access) systems over multipath Rayleigh fading channels. The advantages of general DF schemes come at the expense of the spectral efficiency since the source and all the relays must transmit on orthogonal channels. In order to mitigate this disadvantage of general DF schemes, we have applied CDD techniques to each relays so that all the relays can transmit on single channel. It means that all R-D link channels can be considered as a single channel which is widely delay spread. Namely, it causes the increasing the number of multipath so that the frequency diversity gain can be achieved in MC-CDMA systems. By simulations, we have compared proposed one with general DF scheme. Therefore, 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, DF-Relay, MC-CDMA, multipath Rayleigh fading channels

I. 서 론

페이딩 채널의 영향을 극복하고자 하는 것은 이동통신 시스템에서 항상 중요한 과제 중에 하나이며, 그 중에서 다이버시티 기법을 사용하는 것은 효율적으로 페이딩 채널의 영향을 극복하는 무선통신 방법으로 널리 사용되고 있다. 그 중에서도 공간 다이버시티 효과를 얻기 위한 방법으로 Source와 Destination 사이에

* 평생회원, 충주대학교 제어계측공학과
(Control and Instrumentation Engineering at
Chungju National University)

** 정회원, 한서대학교 전자공학과
(Electronics, Computer and Communication
Engineering at Hanseo University)

※ “이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2009-0072762, 2010-0002650).”

접수일자: 2010년10월27일, 수정완료일: 2011년5월17일

Relay를 사용하는 협력 통신 기법에 관한 연구들이 광범위하게 수행되고 있다^[1~5]. 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. AF 프로토콜은 Relay가 Source로부터 수신한 신호를 증폭하여 재전송하는 방식으로 복잡도가 작지만 노이즈가 증폭 되는 단점이 있고 DF는 Relay가 Source로부터 수신한 신호를 복호 후 재생성하여 전송하는 방식으로 복잡도가 크지만 Relay가 복호에 성공한 경우에는 AF에 비하여 향상된 성능을 나타낸다^[4]. 기존의 DF-Relay 기법이 갖는 가장 큰 단점으로는 직교 채널을 통한 전송으로 야기되는 주파수 효율(Spectral Efficiency)의 손실이 있고 이를 해결하기 위한 연구들도 진행되고 있는 상황이다^[3~4].

이와 병행하여 순환 지연 다이버시티(Cyclic Delay Diversity: CDD)에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다^[6~10]. 지연 다이버시티(Delay Diversity)이라고 불리는 간단한 전송 안테나 기법은 1993년 Wittneben에 의해 제안되었다^[6]. 그리고 Kaiser는 이 기법을 OFDM 시스템에 적용하여 저 복잡도의 전송 다이버시티 기법이 OFDM 시스템의 주파수 축에 적용 가능함을 보였다^[7]. 이러한 연구들에서 신호 샘플의 지연이 아닌 순환 지연(Cyclic Delay)을 사용하기 때문에 이를 CDD라 칭하고 있다^[8]. CDD의 가장 큰 특징은 표준의 변형 없이 다중 안테나를 통한 다이버시티를 얻을 수 있다는 장점이 있고 디지털 방송에 적용된 연구가 최근에 수행되고 있는 상황이다^[9~10].

본 논문에서는 이러한 CDD 기법을 DF-Relay에 적용함으로써 일반적인 DF-Relay 기법의 단점을 극복하고자 한다. 그리고 제안된 기법의 성능을 MC-CDMA 시스템에서 확인하도록 한다.

II. MC-CDMA DF-Relay 시스템

MC-CDMA Relay 시스템에서는 그림 1과 같이 S(Source) 노드에서 MC-CDMA 심벌을 전송한다. 그리고 Relay(R) 노드들에서는 수신된 신호를 복조한 후 재생성된 신호를 각각 다른 시간슬롯을 이용하여 재전송하게 된다. 따라서 D(Destination) 노드에서는 신호의 간섭 없이 수신된 신호를 결합함으로써 다이버시티 이득을 얻게 된다.

1. S-D 및 S-R 링크의 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 변환한 후 보호구간을 Cyclic Prefix 형태로 삽입하여 전송하게 된다.

본 논문에서는 편의상 0번째 전송 신호만을 고려하도록 한다. 따라서 0번째 전송 심벌에 대한 m 번째 확산코드의 전송 신호는 다음과 같이 표현된다^[11~12].

$$s_m(t) = \sum_{n=0}^{N-1} b_m c_{m,n} p(t) \exp(j2\pi f_n g(t)) \quad (1)$$

여기서 $f_n = n/T$ 이고 $b_m = \pm 1$ 는 m 번째 확산코드의 BPSK 심벌, $|c_{m,n}| = 1$ 는 m 번째 확산코드의 n 번째 부반송파 코드, $p(t)$ 는 구간 $[-T_G, T)$ 에서 값을 갖고 $\int_{-T_G}^T p^2(t) dt = 1$ 을 만족하는 사각 펄스신호다. 또한 T 는 비트 간격을, $T_G (= GT_c)$, $T_c = T/N$ 는 보호구간을, $T_S (= T + T_G)$ 는 보호구간을 포함하는 MC-CDMA 심벌 간격을 각각 나타낸다. 그리고 Cyclic Prefix 형태의 보호구간을 나타내기 위하여 $g(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$g(t) = \begin{cases} (t+T), & -T_G \leq t < 0 \\ t, & 0 \leq t < T \end{cases} \quad (2)$$

식 (1)의 전송 신호는 각 링크의 다중경로 페이딩 채널을 통과한 후 가산성 백색 잡음(Additive White Gaussian Noise: AWGN)이 더해져 수신된다.

본 논문에서는 여러 심벌간격 동안에 채널 상태가 변하지 않는 다중경로 레일리 페이딩 채널을 가정한다^[13]. 따라서 r 번째 링크의 다중 경로수가 L^r 이면 l 번째 경로의 채널은 $h_l^r (l=0, 1, \dots, L^r-1)$ 로 표현할 수 있다. 여기서 h_l^r 의 크기는 레일리 분포를 갖고 위상은 $[0, 2\pi)$ 동

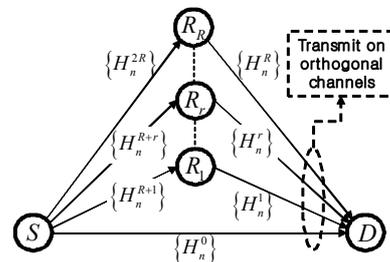


그림 1. MC-CDMA 시스템의 일반적인 DF-Relay 기법
Fig. 1. General DF-Relay scheme for MC-CDMA system.

안에 균일하게 분포하며 각 경로와 링크들 간에 상호 독립적인 랜덤 변수들로 가정한다. 그리고 다중경로 성분들의 채널 탭 간격을 T_c 라고 할 때, r 번째 링크의 n 번째 부반송파의 채널 응답은 다음과 같다^[11].

$$H_n^r = \sum_{l=0}^{L^r-1} h_l^r \exp(-j2\pi nl/N) \quad (3)$$

여기서 $E\left(\sum_{l=0}^{L^r-1} |h_l^r|^2\right) = 1$ 과 경로들 간의 지수함수적 감소인자(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.

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 동기화 완벽하다고 가정할 때, 0번째 심벌에 대한 i 부반송파에 해당하는 이산 신호의 표현은 다음과 같다.

$$y_i^r = b_0 H_i^r c_{0,i} + \sum_{m=1}^{M-1} b_m H_i^r c_{m,i} + n_i^r \quad (4)$$

여기서 y_i^0 와 y_i^{R+r} 는 S-D 링크 및 r 번째 S-R 링크의 수신 신호를 의미한다. 잡음 성분의 평균은 $E(n_i^r) = 0$ 이고 분산은 $E(|n_i^r|^2) = \sigma^2$ 이다.

2. MC-CDMA 시스템의 결합 기법

일반적인 MC-CDMA 시스템에서 반송파 단위로 적용이 가능한 결합기법으로는 MRC, EGC, ZF 및 MMSE-C가 있다. 편의상 0번째 확산코드에 대한 결합 계수를 표현하면 다음과 같다^[14~15].

$$w_{0,i}^{r,X} = \begin{cases} c_{0,i}^* H_i^{r*} / N & , X = MRC \\ c_{0,i}^* H_i^{r*} / (N |H_i^r|) & , X = EGC \\ c_{0,i}^* / (N |H_i^r|) & , X = ZF \\ \frac{c_{0,i}^* H_i^{r*}}{N(|H_i^r|^2 + \sigma^2/M)} & , X = MMSE-C \end{cases} \quad (5)$$

여기서 X 는 결합기법을 나타내는 변수이다.

확산 코드 블록 단위로 적용이 가능한 MC-CDMA 시스템의 결합기법에는 JD-ZF와 JD-MMSE가 있다. 이를 위해 식 (4)의 i 번째 부반송파에 대한 신호 표현을 이용해 수신 신호 벡터를 표현하면 다음과 같다.

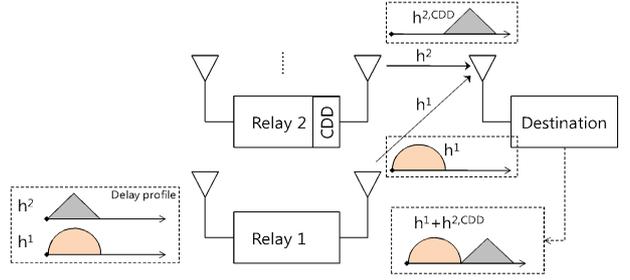


그림 2. CDD-DF-Relay 기법의 블록도
Fig. 2. Block diagram of CDD-DF-Relay scheme.

$$\mathbf{y}^r = \mathbf{A}^r \mathbf{b}^r + \mathbf{n}^r$$

$$\begin{pmatrix} y_0^r \\ \vdots \\ y_{N-1}^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_0^r c_{0,0} & \cdots & H_0^r c_{M-1,0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N-1}^r c_{0,N-1} & \cdots & H_{N-1}^r c_{M-1,N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ \vdots \\ b_{M-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_0^r \\ \vdots \\ n_{N-1}^r \end{pmatrix} \quad (6)$$

JD-ZF 및 JD-MMSE의 경우에 대한 전체 결합 계수 벡터는 각각 다음과 같다^[15~16].

$$\mathbf{W}^{r,X} = \begin{cases} [\mathbf{A}^{rH} \mathbf{A}^r]^{-1} \mathbf{A}^{rH} & , X = JD-ZF \\ [\mathbf{A}^{rH} \mathbf{A}^r + \sigma^2 \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{A}^{rH} & , X = JD-MMSE \end{cases} \quad (7)$$

따라서 0번째 확산코드에 대한 결합계수 벡터는 전체 결합계수 벡터의 0번째 행벡터로 각각 $\mathbf{w}_0^{r,JD-ZF}$ 와 $\mathbf{w}_0^{r,JD-MMSE}$ 로 표현된다.

3. Destination에서의 결정 변수

S-R 링크의 r 번째 릴레이에서 복호 후 재생성된 심벌은 다음과 같다.

$$\hat{b}_0^r = \text{sig} \left(\sum_{i=0}^{N-1} y_i^{R+r} w_{0,i}^{R+r,X} \right) \quad (8)$$

여기서 $\text{sig}(\cdot)$ 는 signum 함수이다. 각 릴레이 단에서는 MC-CDMA 심벌을 발생시켜 전송하게 된다. 따라서 r 번째 R-D 링크에 대한 수신신호는 다음과 같다.

$$y_i^r = \hat{b}_0^r H_i^r c_{0,i} + \sum_{m=1}^{M-1} \hat{b}_m^r H_i^r c_{m,i} + n_i^r \quad (9)$$

그리고 S-R-D 링크를 결합한 결정 변수는 다음과 같다.

$$v_0^{SRD,X} = \sum_{r=1}^R \sum_{i=0}^{N-1} y_i^r w_{0,i}^{r,X} \quad (10)$$

또한 S-R-D 링크 및 S-D 링크의 신호를 결합한 경우의 결정 변수는 다음과 같다.

$$v_0^{Comb,X} = \sum_{r=0}^R \sum_{i=0}^{N-1} y_i^r w_{0,i}^{r,X} \quad (11)$$

III. MC-CDMA CDD-DF-Relay 시스템

Relay 시스템의 가장 큰 단점은 Relay 노드들 증가에 따른 주파수 효율의 저하이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 그림 2의 CDD-DF-Relay 시스템을 제안한다. 제안된 시스템에서는 모든 Relay 노드들이 같은 시간 슬롯을 이용하면서 다이버시티 이득을 얻기 위하여 미리 할당된 지연 값으로 Cyclic Delay를 적용한 후 재생성된 심벌을 전송한다. 따라서 최종 수신단 D에서는 그림과 같이 채널의 탭수가 길어진 효과를 얻게 된다. 즉, 다중 경로수 증가에 따른 주파수 다이버시티를 얻을 수 있다.

1. CDD 적용에 따른 R-D 링크의 신호 모델

제안된 CDD-DF-Relay 시스템에서 r 번째 Relay는 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 주파수 축 채널 이득은 다음과 같이 표현된다^[8].

$$H_n^{r,CDD} = \sum_{l=D^r}^{L^r-1+D^r} h_{l-D^r}^r \exp(-j2\pi nl/N) \quad (12)$$

또한 모든 Relay가 하나의 시간 슬롯을 이용해 전송한 신호들에 대한 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_i^{CDD} = \sum_{r=1}^R \hat{b}_0^r H_i^{r,CDD} c_{0,i} + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{r=1}^R \hat{b}_m^r H_i^{r,CDD} c_{m,i} + n_i^{CDD} \quad (13)$$

제안된 CDD-DF-Relay 시스템의 R-D 링크 신호를 수신하기 위한 결합계수는 식 (5)~(7)의 H_i^r 을

$$H_i^{CDD} = \sum_{r=1}^R H_i^{r,CDD} \text{로 대체하여 유도할 수 있다.}$$

$$w_{0,i}^{CDD,X} = w_{0,i}^{r,X} |_{H_i^r = H_i^{CDD}} \quad (14)$$

2. CDD 적용에 따른 Destination에서의 결정 변수 제안된 기법의 S-R-D 링크에 대한 결정 변수는 다음과 같다.

$$v_0^{CDD-SRD,X} = \sum_{i=0}^{N-1} y_i^{CDD} w_{0,i}^{CDD,X} \quad (15)$$

또한 S-R-D 링크 및 S-D 링크의 신호를 결합한 경우의 결정 변수는 다음과 같다.

$$v_0^{CDD-Comb,X} = v_0^{CDD-SRD,X} + \sum_{i=0}^{N-1} y_i^0 w_{0,i}^{0,X} \quad (16)$$

IV. 모의실험 결과

본 장에서는 일반적인 DF-Relay 및 CDD-DF-Relay MC-CDMA 시스템의 성능을 주파수 선택적 다중경로 레일리 페이딩 채널에서의 모의실험을 통하여 확인하고 비교 분석한다. 모의실험에서는 MC-CDMA 시스템의 변수로 $N=64$, $M=64$ 및 $T_G/T=1/8$ 을 가정하였다. 확산코드로는 Walsh-Hadamard 코드를 사용하였고 $SNR = E\left(\sum_{i=0}^{L^r-1} |h_i^r|^2\right) / (\sigma^2/N)$ 을 가정하였다. 또한 그림 3-5에서는 $L^0=4$, $L^{R+r}=L^r=2$ 및 $D^r=(r-1)L^r$ 를 고려하였다. 즉, S-D 링크의 다중경로 수는 4개이고 S-R 및 R-D 링크의 다중경로 수는 2이다.

그림 3은 $R=1$ 일 때 다양한 결합기법에 대한 평균

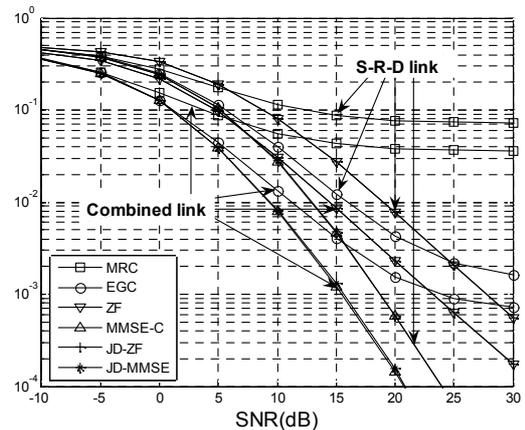


그림 3. DF-Relay 시스템의 다양한 결합기법에 대한 SNR 변화에 따른 평균 오류율 ($R=1, L^r=2$)
Fig. 3. Averaged BER versus SNR with respect to different combining schemes for MC-CDMA system ($R=1, L^r=2$).

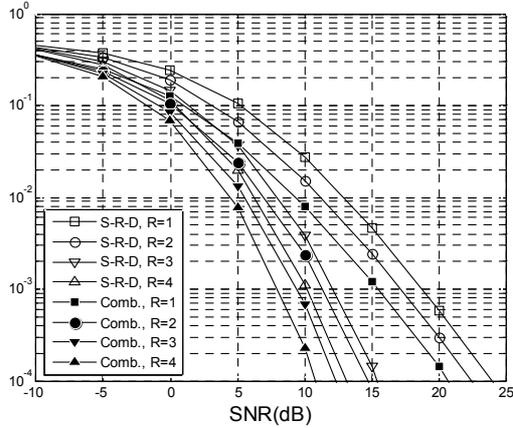


그림 4. DF-Relay 시스템의 다양한 Relay 개수에 대한 SNR 변화에 따른 평균 오류율

$$(L^r = 2, R \in \{1, 2, 3, 4\}, X = MMSE - C)$$

Fig. 4. Averaged BER versus SNR with respect to different number of Relays for DF-Relay systems

$$(L^r = 2, R \in \{1, 2, 3, 4\}, X = MMSE - C).$$

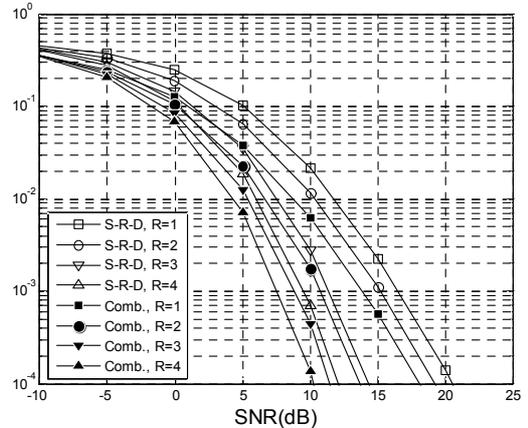


그림 6. DF-Relay 시스템의 다양한 Relay 개수에 대한 SNR 변화에 따른 평균 오류율

$$(R \in \{1, 2, 3, 4\}, X = MMSE - C)$$

Fig. 6. Averaged BER versus SNR with respect to different number of Relays for DF-Relay systems ($R \in \{1, 2, 3, 4\}, X = MMSE - C$).

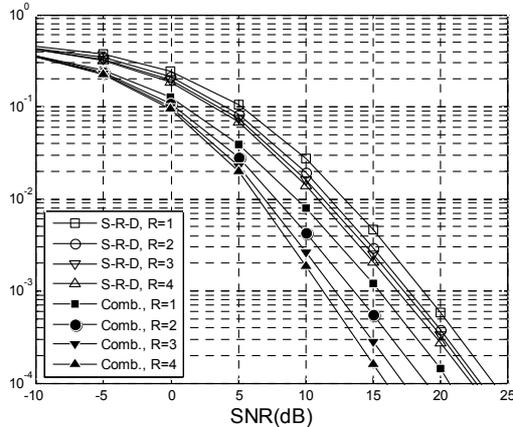


그림 5. CDD-DF-Relay 시스템의 다양한 Relay 개수에 대한 SNR 변화에 따른 평균 오류율

$$(L^r = 2, R \in \{1, 2, 3, 4\}, X = MMSE - C)$$

Fig. 5. Averaged BER versus SNR with respect to different number of Relays for CDD-DF-Relay systems ($L^r = 2, R \in \{1, 2, 3, 4\}, X = MMSE - C$).

오류율 성능을 SNR에 따라 비교하고 있다.

이미 알려진 바와 같이 Full-load ($M = N$)의 경우 ZF 과 JD-ZF은 같은 성능을 나타낸다. 또한 MMSE-C와 JD-MMSE도 같은 성능을 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 Full-load의 경우에 대해 MMSE-C를 결합기법으로 선택하고 다양한 Relay 개수에 대한 성능을 비교하도록 한다.

그림 4와 5는 일반적인 DF-Relay 및 제안된

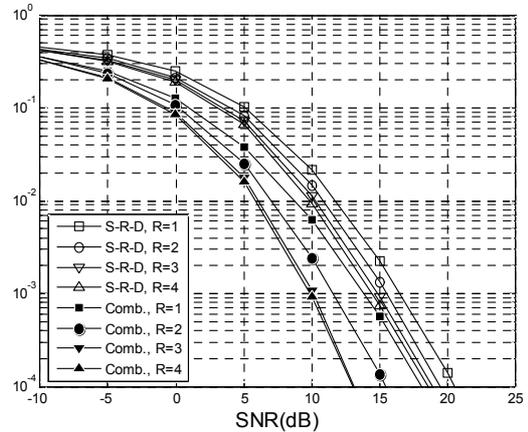


그림 7. CDD-DF-Relay 시스템의 다양한 Relay 개수에 대한 SNR 변화에 따른 평균 오류율

$$(L^r = 4, R \in \{1, 2, 3, 4\}, X = MMSE - C)$$

Fig. 7. Averaged BER versus SNR with respect to different number of Relays for CDD-DF-Relay systems ($L^r = 4, R \in \{1, 2, 3, 4\}, X = MMSE - C$).

CDD-DF-Relay에 대한 평균 오류율 성능을 SNR 및 Relay 개수 R 의 변화에 따라 각각 비교한다. 그림 4를 통해 일반적인 DF-Relay 시스템의 성능은 R 의 증가에 따라 다이버시티 이득에 의해 향상됨을 알 수 있다. 하지만 DF-Relay는 R 의 증가는 $R+1$ 개의 직교 채널을 필요로 하기 때문에 스펙트럼 효율의 저하가 발생할 수 있음을 의미한다. 반면에 그림 5의 CDD-DF-Relay는 R 이 증가되더라도 항상 두 개의 직교 채널만을 통해 전송이 이뤄짐으로 스펙트럼 효율의 저하가 발생되지

않는다. 뿐만 아니라 R 의 증가에 따른 다중경로 수 증가는 주파수 다이버시티의 증가로 이어지고 이에 따른 성능향상을 관찰할 수 있다.

그림 6-7에서는 다른 변수는 앞의 그림과 동일하게 하고 $L^0 = L^{R+r} = L^r = 4$ 및 $D^r = (r-1)(L^r-1) \bmod G$ 를 고려한다. 즉, 모든 링크의 다중경로수가 4인 경우를 나타낸다. 이 경우는 S-R 및 R-D 링크의 다중경로 수 증가를 의미하므로 그림 4와 6을 비교할 때, 경로수 증가에 따른 다이버시티 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 $D^r = (r-1)(L^r-1) \bmod G$ 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 그림 7의 $R=3$ 및 $R=4$ 에 대한 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 평균오류를 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 MC-CDMA 시스템에 대한 CDD-DF-Relay 기법을 제안하였다. 일반적인 DF-Relay 기법에서는 Relay 개수가 증가됨에 따라 필요한 직교채널 수가 증가되는 반면에, 제안된 CDD-DF-Relay 기법에서는 Relay 개수가 증가에 상관 없이 제안된 R-D 링크에 대해 하나의 채널만을 사용한다. 따라서 릴레이 증가에 따른 주파수 효율의 저하 없이 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 그리고 모의실험을 통하여 제안된 기법의 성능이 비교 검증되었다.

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] A. Bletsas, H. Shin, M. Z. Win, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. of Selected Areas in Comm.*, vol. 24, no. 3, pp. 659-672, Mar. 2006.
- [4] S. S. Ikki, and M. H. Ahmed. "Performance Analysis of Adaptive Decode-and-Forward Cooperative Diversity Networks with Best-Relay Selection," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 58, no. 1, pp. 68-72, Jan. 2010.
- [5] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "End-to-End performance of transmission systems with relays over Rayleigh-fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, Nov. 2003.
- [6] A. Wittneben, "A new bandwidth efficient transmit antenna modulation diversity scheme for linear digital modulation," in *Proceedings IEEE ICC 1993*, Geneva, Switzerland, May 1993, pp. 1630-1634.
- [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] Y. Zhang, J. Cosmas, K.-K. Loo, M. Bard, and R. D. Bari, "Analysis of Cyclic Delay Diversity on DVB-H Systems over Spatially Correlated Channel," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 53, no. 1, pp. 247-255, Mar. 2007.
- [10] Yue Zhang, C. Zhang, J. Cosmas, K. K. Loo, T. Owens, R. D. Di Bari, Y. Lostonlen, and M. Bard, "Analysis of DVB-H Network Coverage With the Application of Transmit Diversity," *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 54, no. 3, pp. 568-577, Sep. 2008.
- [11] 고균병, 우중재, "비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템에서의 시간 오프셋 영향 분석," *전자공학회 논문지*, 제47권, TC편, 제8호, 1-8쪽, 2010년 8월.
- [12] 고균병, 우중재, "비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템에서의 간류 주파수 오프셋 영향 분석," *전자공학회논문지*, 제47권, TC편, 제8호, 9-15쪽, 2010년 8월.

- [13] John G. Proakis, *Digital Communication*. McGraw Hill, 1995.
- [14] J. F. Helard, J. Y. Baudais, and J. Giterne, "Linear MMSE detection techniques for MC-CDMA," *ELECTRONICS LETTERS*, vol. 36, no. 7, pp. 665-666, Mar. 2000.
- [15] Keli Zhang, Yong Liang Guan, and Qinghua Shi, "Complexity Reduction for MC-CDMA With MMSEC," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 57, no. 3, pp. 1989-1993, May 2008.
- [16] A. Klein, G. K. Kaleh, and P. W. Baier, "Zero forcing and minimum-mean-square-error equalization for multiuser detection in code division multiple access channels," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 45, no. 2, pp. 276-287, May 1996.

 저 자 소 개

고 균 병(평생회원)
 대한전자공학회논문지
 제47권 TC편 제 8호 참조.

우 증 재(정회원)
 대한전자공학회논문지
 제47권 TC편 제 8호 참조.