

특집논문-08-13-2-01

OFDM 시스템을 위한 순환 지연을 사용하는 협력 다이버시티 기법

이동우^{a)†}, 정영석^{b)}, 이재홍^{a)}

Cooperative Diversity using Cyclic Delay for OFDM systems

Dongwoo Lee^{a)†}, Young Seok Jung^{b)}, and Jae Hong Lee^{a)}

요 약

고속데이터무선통신시스템을 위한 핵심기술로 각광받고 있는 OFDM은 디지털 오디오 방송(DAB)과 디지털 지상 텔레비전 방송(DVB-T)의 표준 기술로 채택되었다. 최근 활발하게 연구되고 있는 협력 다이버시티 기술을 OFDM에 적용할 경우, 다이버시티 이득과 시스템 용량을 극대화시켜서 차세대 무선통신이 요구하는 높은 데이터 전송률과 신뢰도를 달성할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 OFDM 시스템을 위한 순환 지연을 사용하는 협력 다이버시티 기법을 제안한다. 제안된 기법에서는 다중 중계 단말기를 사용하여 단일 중계단말기를 위한 협력 다이버시티 기법에 비해 비약적인 성능 향상을 제공하고, 다중 중계단말기의 협력에 따른 이득을 극대화시키기 위하여 순환 지연을 적용한다. 모의실험을 통해 제안된 기법이 기존 시스템에 비해 우수한 성능을 제공함을 보인다.

Abstract

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is one of the most promising technologies for high data rate wireless communications. OFDM has been adopted in wireless standards such as digital audio/video broadcasting. The combination of OFDM and cooperative diversity techniques can provide the diversity gain and/or increased capacity. In this paper, the cooperative coding using cyclic delay diversity (CDD) for multiuser OFDM systems is introduced. To improve the beneficial effects of relays' cooperation, CDD is adopted in cooperative transmission of relays. Simulation results show the bit error rate (BER) for various consideration. The proposed scheme provides improved performance compared to delay.

Keywords : OFDM, Cooperative Diversity, Cyclic Delay Diversity, Digital Audio Broadcasting, Digital Video Broadcasting

1. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은

고속데이터전송 무선통신시스템을 위한 물리계층기술로 최근 활발하게 연구되고 있다. OFDM 기술은 주파수선택적 페이딩에 강건한 특성을 가지며 높은 스펙트럼 효율 및 낮은 구현 복잡도를 제공하는 장점을 갖는다. 이에 따라 OFDM 기술은 디지털 오디오 방송(DAB: Digital Audio Broadcasting)과 디지털 지상 텔레비전 방송(DVB-T: Digital Video Broadcasting-Terrestrial)의 표준 기술로 채택되었다.

최근 OFDM 기술과 다중 송수신안테나 기술의 결합을

a) 서울대학교 전기공학부, 뉴미디어통신공동연구소
School of Electrical Engineering, Seoul National University

b) (주)삼성전자

Samsung Electronics Co., LTD.

† 교신저자 : 이동우(idw81@snu.ac.kr)

※ 이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2007-000-11844-0)

통해 다이버시티 이득과 시스템 용량을 극대화시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 MIMO-OFDM 기술의 장점으로 인해, MIMO-OFDM 기술은 4세대 이동통신, IEEE 802.16, IEEE 802.11n 등의 고속데이터전송 무선통신시스템을 위한 핵심 기술로 각광받고 있다^[1]. 그러나 무선 환경에서는 제한된 단말기 크기와 복잡도 등의 이유로 여러 개의 안테나를 갖는 무선 단말기 구현이 현실적으로 어렵다^[2]. 그러나 단일 안테나 환경의 무선 단말기들이 서로 안테나 등의 자원을 이용하여 공간 다이버시티 이득을 얻는 협력 다이버시티 기술을 OFDM 기술에 적용할 경우, MIMO-OFDM 기술이 가졌던 제반 장점들을 얻는 동시에 물리적인 구현 한계를 극복할 수 있다. 또한 기존 단일 사용자를 위한 협력 다이버시티 기술에 비해 다중 사용자를 위한 협력 다이버시티 기술이 사용자 수에 따른 다이버시티 이득 증대를 얻을 수 있었던 것처럼, 협력 다이버시티 기술을 다중 사용자 OFDM 시스템에 적용할 경우 단일 사용자 OFDM 시스템을 위한 협력 다이버시티에 비해 증대된 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 OFDM 시스템을 위한 순환 지연을 사용하는 협력 다이버시티 기법을 제안한다. 제안된 기법에서는 다중 중계단말기들의 협력에 따른 이득을 극대화시키기 위하여 다중 중계단말기들의 전송에 순환 지연을 적용한다. 모의실험에서는 기존 시스템과 제안된 기법의 비트 오율(BER: bit error rate) 성능 비교를 통해 제안된 기법의 우수성을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 본 연구의 시스템 모델 및 제안된 기법에 대해 설명한다. 3절에서는 모의실험을 통해 제안된 기법과 기존 시스템의 비트 오율 성능을 살펴본다. 마지막으로 4장에서 결론을 내린다.

II. 시스템 모델

이 절에서는 다중 사용자 OFDM 시스템을 위한 순환 지연을 사용하는 협력 다이버시티 기법을 제안한다. 제안된 기법에서는 하나의 안테나를 갖는 $M+2$ 개의 단말기로 구성된 무선통신 네트워크 시스템을 가정하였다. 무선통신 네트워크 시스템은 하나의 송신단말기(source) s 와 하나의 수신지(destination) d , 그리고 M 개의 중계단말기(relay), $I = \{0, 1, \dots, M-1\}$, $i \in I$ 로 구성되어 있다. OFDM 기반 다중 사용자 시스템을 위한 협력 다이버시티 기법은 협력에 사용하는 모든 사용자들이 동일하게 협력에 따른 이득을 얻지만, 본 논문에서는 편의상 M 개의 중계단말기를 갖는 하나의 송신단말기를 중심으로 논의를 전개한다.

협력 다이버시티 기법을 적용하지 않은 직접 전송의 경우, 각 사용자들은 N 개의 심볼로 구성된 직교한 시간 슬롯을 채널 자원으로 갖는다. OFDM 기반 다중 사용자를 위한 협력 다이버시티 기법의 경우, 각 사용자들은 전체 사용 가능한 채널을 각각 자신의 전송과 중계단말기들의 중계 전송을 위해 두개의 직교하는 서브채널(subchannel)로 나누어 사용한다.

그림 1은 OFDM 을 위한 순환 지연을 사용한 협력 다이버시티 기법을 적용한 송신단말기의 송신기 구조이다^[1]. 각 단말기에서 전송하고자 하는 데이터는 채널 부호화를 통해 부호화된다. 부호화된 심볼들은 IDFT(inverse discrete Fourier transform)된 후 보호 구간(guard interval) 길이만큼의 cyclic prefix(CP)가 첨가되고 송신안테나를 통해 송신된다.

첫 번째 서브채널에서 송신단말기는 자신이 수신지로 전송하고자 하는 부호화된 심볼의 절반을 IDFT한 후 CP를 첨가한 다음 중계단말기와 수신지에 브로드캐스트(broadcast)한다. 두 번째 서브채널에서 각 중계단말기들은 송

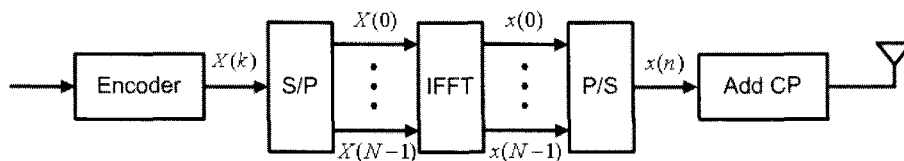


그림 1. OFDM 기반 다중 사용자 시스템을 위한 협력 다이버시티 기법을 적용한 송신단말기의 송신기 구조
 Fig. 1. The proposed transmitter structure employing cyclic delay for source

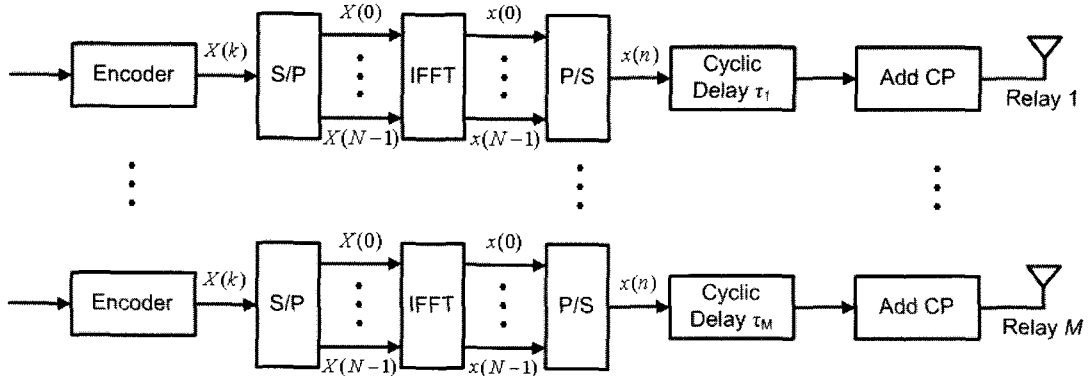


그림 2. OFDM 기반 다중 사용자 시스템을 위한 협력 다이버시티 기법을 적용한 중계단말기의 송신기 구조
 Fig. 2. The proposed transmitter structure employing cyclic delay for relay

신단말기로부터 수신한 신호의 CP 제거 및 DFT(discrete Fourier transform)하고 복호화한 후 CRC(cyclic redundancy check: 순환잉여검사)를 통해 오류를 검출한다. CRC로 오류가 검출되지 않은 중계단말기들은 협력에 참여하게 되고, 오류가 검출된 중계단말기들은 협력에 참여하지 않게 된다^[2].

그림 2는 OFDM을 위한 순환 지연을 사용한 협력 다이버시티 기법을 적용한 중계단말기의 송신기 구조를 보여준다. CRC로 오류가 검출되지 않은 중계단말기들은 복호된 신호를 재부호화해서 송신단말기에서 송신되지 않은 부호화된 심볼의 나머지 절반을 생성한다. 송신단말기에서 송신되지 않은 부호화된 심볼의 나머지 절반은 송신단말기에 할당된 채널의 두 번째 서브채널 동안 CRC에서 오류가 검출되지 않은 중계단말기들에 의해 수신지로 전송된다. 이때, 중계단말기들에 의해 송신될 심볼들은 IFFT된 후 그림 2와 같이 각 중계단말기마다 다른 심볼 수만큼의 순환지연 시킨 다음 CP를 첨가하고 수신지로 전송된다. 만약 모든

중계단말기에서 CRC에 따른 오류가 검출되어 모든 중계단말기가 협력에 참여하지 않게 될 경우, 중계단말기들은 1비트의 정보를 송신단말기에 전송하여서, 두 번째 서브채널 동안 송신단말기가 첫 번째 서브채널 동안 송신단말기에 의해 전송되지 않은 부호화된 심볼의 나머지 절반을 전송하게 한다. 수신지에서는 매 서브채널마다 채널을 추정하기 때문에 복호화 알고리즘에는 변화가 없고, 중계단말기들의 협력 여부에 따라 수신지에서 수신되는 송신단말기의 전송률 변화도 없다.

그림 3은 제안된 기법에서 중계단말기가 협력에 참여할 경우, 부호율(rate)이 1/4인 convolutional code 사용에 따른 심볼 전송 예를 보여준다. 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼, 전체 심볼의 절반은 송신단말기에 의해 수신지로 전송되고, 송신단말기에 의해 전송되지 않은 전체 심볼의 나머지 절반은 협력에 참여하는 중계단말기들에 의해 수신지에 전송된다. 결과적으로 수신지 측에서는 부호율이 1/4인 convolutional code로 부호화된 송신단말기의 전송 데이터를

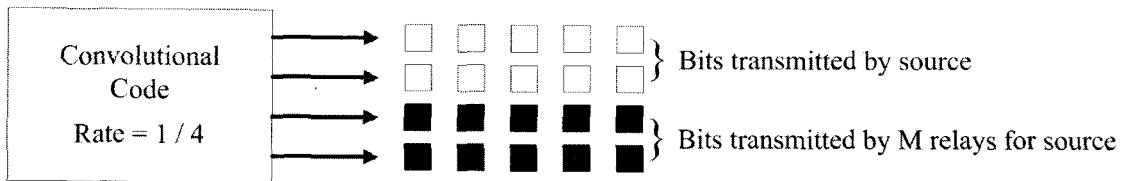


그림 3. 부호율이 1/4인 convolutional code를 사용한 OFDM 기반 다중 사용자 시스템을 위한 협력 다이버시티 기법 심볼 전송의 예
 Fig. 3. Example of proposed cooperative diversity for the rate 1/4 convolutional code

수신할 수 있게 된다.

길이 N 의 주파수 영역 데이터, (X_0, \dots, X_{N-1}) 가 N 개의 부반송파(subcarrier)에 변조될 때, 시간 영역 OFDM 심볼은 주파수 영역 데이터를 IDFT함으로서 다음과 같이 주어진다.

$$x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^{N-1} X(k) e^{j(2\pi/N)kn}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (1)$$

상기 식에서 n 은 시간을, k 는 주파수를 나타낸다. 길이 G 를 갖는 CP가 $x(n)$ 에 덧붙여지면,

$$\tilde{x}(n+G)_{N+G} = x(n)_N, \quad n = 0, 1, \dots, N+G-1. \quad (2)$$

상기 식에서 $(n)_N$ 은 n 을 modulo N 연산한 나머지이다.

첫 번째 서브채널에서, 송신단말기에 의해 송신된 데이터가 i 번째 중계단말기와 수신지에서 수신될 때, 수신된 시간 영역 신호는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$y_{si}(n) = h_{si}(n) \otimes x(n) + n_{si}(n) \quad (3)$$

$$y_{sd}(n) = h_{sd}(n) \otimes x(n) + n_{sd}(n) \quad (4)$$

상기 식에서 \otimes 는 컨볼루션 연산을 의미하고, $y_{pq}(n)$ 는 p 단말기로부터 q 단말기에 수신되는 신호, $x(n)$ 은 송신단말기가 송신한 신호, $h_{pq}(n)$ 은 p 단말기로부터 q 단말기에 수신되는 페이딩 채널 계수이며, $n_{pq}(n)$ 는 p 단말기로부터 q 단말기에 수신되는 가산성 잡음이다. $h_{pq}(n) = 0, n = L, \dots, N-1$ 이고 L 은 다중경로채널의 개수를 나타낸다.

채널 계수 $h_{pq}(n)$ 와 잡음 $n_{pq}(n)$ 는 평균이 0이고, 각각 1과 N_0 를 분산으로 갖는 독립적 원형 대칭 복소 가우시안 랜덤 변수(independent circularly symmetric complex Gaussian random variable)와 동일한 분포이다. 또한 페이딩 계수가 한 프레임동안 일정하고 각 단말기들 간에 독립적인 준정상(quasi-static) 페이딩채널을 가정하였다.

두 번째 서브채널에서, 각 중계단말기들은 송신단말기

로부터 수신한 신호의 CP 제거 및 DFT(Discrete Fourier transform)하고 복호한 후 CRC를 통해 오류를 검출한다. CRC로 오류가 검출되지 않은 중계단말기들은 협력에 참여하게 되고, 오류가 검출된 중계단말기들은 협력에 참여하지 않게 된다. CRC로 오류가 검출되지 않은 중계단말기들은 복호된 신호를 재부호화해서 송신단말기에서 송신되지 않은 부호화된 심볼의 나머지 절반을 생성한다. CRC로 오류가 검출되지 않은 중계단말기들이 Q 개일 때, 협력에 참여하는 중계단말기들의 집합은 V 로 나타낸다. 여기서 $i \in V, V \subset I$ 의 관계가 성립된다. 협력에 참여하는 Q 개의 중계단말기로부터 수신지에 수신되는 시간 영역 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$y_{rd}(n) = \alpha \sum_{i \in V} h_{id}(n) \otimes \hat{x}(n - \tau_i)_{N} + n_{rd}(n) \quad (5)$$

상기 식에서 α 는 송신단말기 송신전력 대 중계단말기 송신전력비이고, $\hat{x}(n)$ 은 중계단말기에서 복호 및 추정된 후 재부호화된 신호이다. E_{pq} 가 p 단말기에서 q 단말기로 송신하는 신호의 송신전력일 때, $\alpha = E_{id}/E_{sd}, i \in V$ 로 주어진다. 여기서 $\alpha = 1/M$ 으로 가정한다.

$$x(n) \xrightarrow{DFT} X(k) \text{ 일 때, } x(n-l) \xrightarrow{DFT} e^{-j(2\pi/N)kl} X(k) \text{ 이다.}$$

첫 번째 서브채널에서, 수신지가 송신단말기로부터 받은 주파수 영역 신호는 식 (4)의 DFT를 통해 다음과 같이 주어진다.

$$Y_{sd}(k) = H_{sd}(k) X(k) + N_{sd}(k) \quad (6)$$

상기 식에서 신호가 L 개의 다중경로를 거쳐서 수신될 경우, $H_{sd}(k)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$H_{sd}(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{L-1} h_{sd}(n) e^{-j(2\pi/N)kn} \quad (7)$$

상기 식에서 주파수 비선형적 채널 페이딩을 가정할 경우 $L=1$ 이고, $H_{sd}(k) = h_{sd}(n)/\sqrt{N}$ 이다.

또한 두 번째 서브채널에서 수신지가 중계단말기로부터 받은 주파수 영역 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$Y_{rd}(k) = \alpha \sum_{i \in V} H_{id}(k) e^{-j(2\pi/N)k\tau_i} \hat{X}(k) + N_{rd}(k) \quad (8)$$

상기 식에서 지연 간격(delay interval) τ_i 는 데이터 $\{x(n)\}$ 의 심볼 간격 T 와 같고, 신호가 L 개의 다중경로를 거쳐서 수신될 경우, $H_{id}(k)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$H_{id}(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{L-1} h_{id}(n) e^{-j(2\pi/N)kn} \quad (9)$$

수신지에서 수신되는 주파수 영역의 유효 채널은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} H_{rd}(k) &= \frac{\alpha}{\sqrt{N}} \sum_{i \in V} \left(\sum_{n=0}^{L-1} h_{id}(n) e^{-j(2\pi/N)kn} \right) e^{-j(2\pi/N)k\tau_i} \\ &= \frac{\alpha}{\sqrt{N}} \sum_{i \in V} \sum_{n=0}^{L-1} h_{id}(n) e^{-j(2\pi/N)k(n+\tau_i)} \end{aligned} \quad (10)$$

[4]로부터, 채널 평균 전력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{avg} \equiv \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |H(k)|^2. \quad (11)$$

식 (11)의 정의에 따라 제안된 기법의 두 번째 서브채널의 채널 평균 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} P_{avg} &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left| \sum_{i \in V} H_{id}(k) e^{-j(2\pi/N)k\tau_i} \right|^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left| \sum_{i \in V} \sum_{n=0}^{L-1} h_{id}(n) e^{-j(2\pi/N)k(n+\tau_i)} \right|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

만약 중계단말기들에 순환지연 $\tau_i \geq Li$, $i \in V$ 을 적용하면, 채널 평균 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{avg}^{CDD} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i \in V} |h_{id}(n)|^2. \quad (13)$$

만약 중계단말기들에 순환지연을 적용하지 않으면, 즉, 임의의 순환지연 $\tau_i = 0$, $i \in V$ 이면, 채널 평균 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{avg}^{no CDD} = \sum_{k=0}^{N-1} \left| \sum_{i \in V} h_{id}(n) \right|^2. \quad (14)$$

식 (13)과 (14)에서 볼 수 있는 것처럼, 각 중계단말기마다 순환지연을 적용한 기법과 순환지연을 적용하지 않은 기존 기법의 두 번째 서브채널 구간 채널 평균 전력을 비교하면 다음과 같다.

$$P_{avg}^{CDD} \geq P_{avg}^{no CDD}. \quad (15)$$

상기 식은 순환지연을 적용한 경우가 적용하지 않는 경우에 비해 향상된 채널평균전력을 제공할 수 있음을 보인다.

III. 모의실험

OFDM 시스템을 위한 순환 지연을 사용하는 협력 다이버시티 기법의 모의실험 결과를 위하여 구축장 $K=6$ 인 1/4 부호율을 갖는 (53,67,71,75) convolutional code 및 BPSK (binary phase shift keying) 변조기법을 가정한다. 첫 번째 서브채널에서 송신단말기는 구축장 $K=6$ 인 1/2 부호율을 갖는 convolutional code 중 최적으로 알려진 (53,75) convolutional code를 사용하고, 두 번째 서브채널에서 중계단말기들은 (67,71) convolutional code를 사용한다. 프레임 사이즈는 256비트를 가정하고, 이상적인 CRC code를 가정한다. 채널 모델은 상대전력 0dB, -5dB, -10dB를 갖고, 처음 수신되는 신호로부터 한 심볼씩 지연되는 다중 경로를 갖는 3-ray Rayleigh 페이딩을 가정한다. 중계단말기에는 최적 순환 지연을 적용한다^[5].

그림 4는 협력 가능한 중계단말기 수에 따른 제안된 기법의 비트 오율 성능을 나타낸다. 협력 가능한 중계단말기 수가 1개일 경우, 중계단말기가 송신단말기의 정보를 오류없이 수신하지 못하게 되면 송신단말기는 두 번째 서브채널동

안에 (53,75) convolutional code를 사용하여 재전송하게 된다. 이 경우, 수신지에서는 결과적으로 (53,75,53,75) convolutional code로 부호화된 정보가 수신되기 때문에 (53, 67,71,75) convolutional code를 사용하는 기존 무선통신 시스템에 비해 성능 열화가 발생한다. 그러나 그림 4에서 볼 수 있는 것처럼, 협력 가능한 중계단말기 수가 1개일 경우를 제외하면 제안된 기법은 협력 가능한 중계단말기의 수가 증가할수록 기존 무선통신 시스템에 비해 향상된 성능을 제공한다. 협력 가능한 중계단말기 수가 5인 경우를 기존 무선통신 시스템과 비교할 경우, 비트 오류율이 10^{-3} 인 경우는 8.6 dB, 10^{-4} 인 경우는 11.9 dB의 성능이득을 제공함을 볼 수 있다.

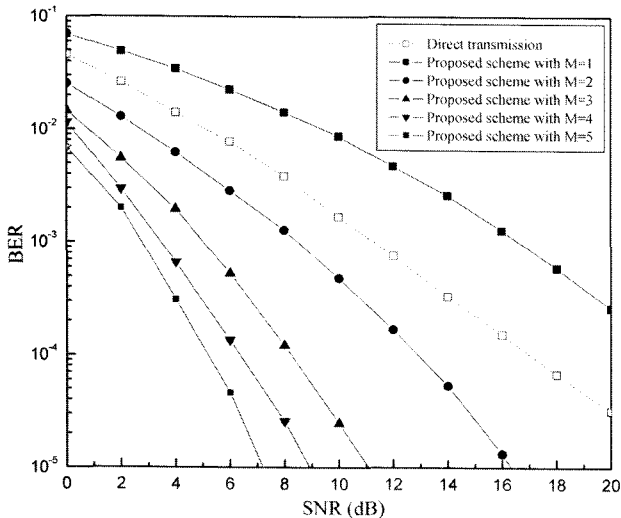


그림 4. 협력 가능한 중계단말기 수에 따른 제안된 기법의 비트 오류 성능
Fig. 4. BER for the proposed scheme according to the number of relays

그림 5는 협력 가능한 중계단말기 수에 따른 제안된 기법에 순환 지연을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 비트 오류 성능을 나타낸다. 순환 지연을 적용하지 않은 경우에 비해, 순환 지연을 적용한 경우 협력 가능한 중계단말기 수가 증가함에 따른 성능 향상 폭이 커진다. 협력 가능한 중계단말기 수가 5인 경우, 순환 지연을 적용한 경우와 순환 지연을 적용하지 않은 경우를 비교하면 비트 오류율이 10^{-3} 인 경우는 1.6 dB, 10^{-4} 인 경우는 2.8 dB의 성능이득을 제공함을 볼 수 있다.

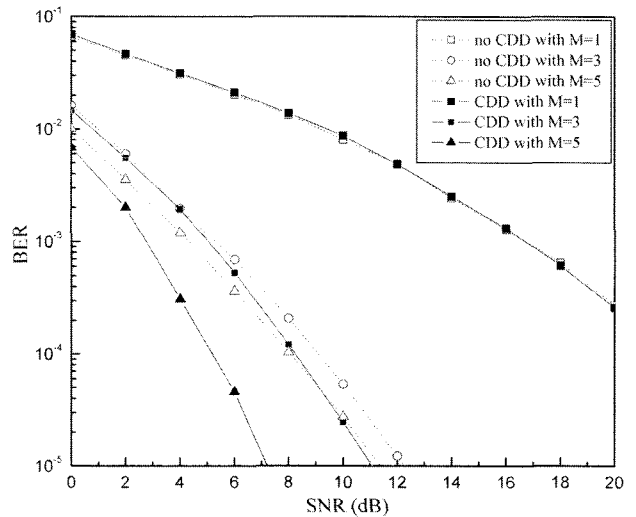


그림 5. 협력 가능한 중계단말기 수에 따른 제안된 기법에 순환 지연을 적용한 경우(CDD)와 적용하지 않은 경우(no CDD)의 비트 오류 성능
Fig. 5. BER for the proposed scheme with/without CDD

IV. 결론

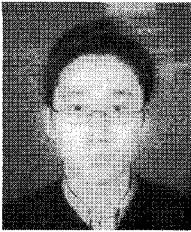
본 논문에서는 OFDM 시스템을 위한 순환 지연을 사용하는 협력 다이버시티 기법을 제안하였다. 중계단말기들의 협력에 따른 이득을 극대화시키기 위하여 각 중계단말기마다 다른 순환 지연을 적용하였다. 제안된 기법은 기존 무선통신 시스템에 비해 향상된 비트오류 성능을 제공한다. 제안된 기법은 협력 가능한 중계단말기 수가 증가함에 따라 더 많은 성능이득을 제공함을 보였다. 또한 제안된 기법과 중계단말기에 순환 지연을 적용하지 않은 기법과의 성능비교를 통하여, 제안된 기법이 더 우수한 성능을 제공함을 보였다.

참고 문헌

- [1] J. Tan and G. L. Stuber, "Multicarrier delay diversity modulation for MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 5, pp. 1756-1763, Sept. 2004.
- [2] 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, no. 10, pp. 2415-2425, Oct. 2003.
- [3] A. Stefanov and E. Erkip, "Cooperative coding for wireless net-

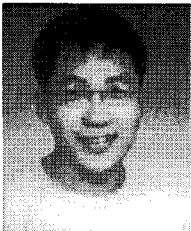
- works," IEEE Trans. Commun., vol. 52, no. 9, pp. 1470-1476, Sept. 2004.
- [4] H. Oh, S. Kim, S. H. Kim, and M. G. Kim, "Novel transmit diversity techniques for broadcast services in cellular networks," in Proc. of IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC), Stockholm, Sweden, May 2005.
- [5] M. Bossert, A. Huebner, F. Schuchlein, H. Haas, and E. Costa, "On cyclic delay diversity in OFDM based transmission schemes," in OFDM workshop, Feb. 2002.
- [6] D. Lee, Y. S. Jeong, J. H. Lee, B. J. Jeong, and T. Noh, "Cooperative coding using cyclic delay for multiuser OFDM systems," accepted for publication to VTC2008-Spring.

저 자 소 개



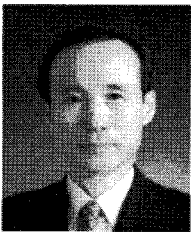
이 동 우

- 2005년 : 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
- 2005년 ~ 현재 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석박사통합과정
- 주관심분야 : 시공간 부호, MIMO, 협력 다이버시티



정 영 석

- 2000년 : 서울대학교 전기공학부 학사
- 2007년 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 2007년 ~ 현재 : (주)삼성전자 통신연구소
- 주관심분야 : 시공간 부호, MIMO, 협력 다이버시티



이 재 홍

- 1976년 : 서울대학교 전자공학과 학사
- 1978년 : 서울대학교 전자공학과 석사
- 1986년 : University of Michigan, Ann Arbor, 전기및컴퓨터공학과 박사
- 1987년 ~ 현재 : 서울대학교 전기공학부 교수
- 1999년 ~ 현재 : 한국방송공학회 부회장
- 2007년 ~ 현재 : IEEE Vehicular Technology Society 수석부회장
- 2008년 ~ 현재 : 대한전자공학회 수석부회장
- 주관심분야 : 디지털통신, 부호이론, MIMO, OFDM