

수신 빔형성 프리앰블을 이용한 송수신 빔형성 기반 OFDMA/TDD 시스템

준회원 허 주*, 종신회원 장 경 희*

The OFDMA/TDD System based on Transmit and Receive Beamforming Utilizing the Preamble for Receive Beamforming

Joo Heo* Associate Member, KyungHi Chang* Lifelong Member

요 약

이동 통신 시스템의 성능은 다중 경로 페이딩, 지연 확산 및 동일 채널 간섭 (Co-Channel Interference : CCI) 에 크게 영향을 받는다. OFDMA (OFDM-FDMA) 시스템은 OFDM 의 특성상 다중 경로 페이딩 및 지연 확산에 쉽게 대처할 수 있다. 또한 OFDMA 시스템은 서브 캐리어 간에 유지되는 직교성을 이용하여 셀 내의 간섭을 피할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 인접 셀로부터 오는 CCI를 감소시키는 면에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 인접 셀로부터의 CCI 를 감소시키고 상향 링크의 성능을 향상시키기 위하여, 배열 안테나 기술을 OFDMA/TDD 시스템에 적용한다. 또한 하향링크의 성능을 향상시키기 위하여, 배열 안테나의 적응을 위한 프리앰블 심볼 구간동안 채널을 추정 한 후, 이 값을 이용하여 하향 링크 전송시 송신 다이버시티 기법의 하나인 TxAA (Transmit Adaptive Array) 방식을 적용하였다. 시뮬레이션 결과에 의하면 다중 경로 레일레이 페이딩 채널에서 단일 안테나 시스템에 비하여 10^3 BER에서 상향링크는 9dB, 하향 링크는 7dB 정도 성능이 개선됨을 알 수 있다.

Key Words : Transmit Beamforming, Receive Beamforming, OFDMA/TDD

ABSTRACT

It is well-known that mobile communication systems are usually limited in their performance and capacity by three major impairments, which are multipath fading, delay spread and co-channel interference (CCI). OFDMA (OFDM-FDMA) system can cope with the multipath fading and delay spread easily due to the beneficial properties of OFDM technology. Though OFDMA scheme avoids intra-cell interference using the orthogonality among subcarriers, the scheme contains difficulty of reducing co-channel interference. Therefore, in this paper, adaptive antenna techniques are deployed into OFDMA/TDD system to minimize the co-channel interference induced by adjacent cells and to enhance the uplink performance. For the improvement of downlink performance, we apply TxAA (Transmit Adaptive Array), a kind of transmit diversity technique, utilizing preamble symbols for training antenna array into OFDMA/TDD transmitter side. Simulation results show that the uplink and downlink performance under multipath Rayleigh fading channel improved 9dB and 7dB each compared with the case of single antenna system at target BER 10^3 .

* 인하대학교 정보통신대학원 이동통신연구실 (khchang@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-05-202, 접수일자 : 2005년 5월 19일

* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2003-000-10685-0) 의 지원으로 수행되었음.

I. 서론

최근 국내외적으로 4세대 이동통신에 대한 관심이 높아지면서, 4세대 이동통신 시스템의 요구 사항을 만족시키는 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히 직교 주파수 분할 다중화 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM) 방식은 높은 전송 효율과 간단한 채널 등화 방식을 지원하는 이유로 하여, 4세대 이동통신 시스템에 적용하기에 적절한 방식중의 하나로서 주목받고 있다. 이러한 OFDM 시스템의 장점을 기반으로 하여, 다양한 QoS (Quality of Service)를 만족시키기 위한 다중 사용자 접속 방식인 직교 주파수 분할 다중 접속 (OFDM-FDMA : OFDMA) 시스템에 대한 연구가 진행중에 있다. OFDMA는 각 사용자에게 서로 다른 서브 캐리어를 할당하는 다중 사용자 접속 방식으로서, 사용자의 요구에 맞추어 다양하게 자원을 할당함으로써 다양한 QoS 를 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다. OFDMA 방식은 IEEE 802.16a 표준의 물리계층이며, 한국에서 활발히 연구되고 있는 초고속 휴대 인터넷의 무선접속 방식으로 채택된 상태이다. 다중화 방식으로는 하향 링크 및 상향 링크의 주파수를 같이 쓰면서 시간으로 구분하는 TDD (Time Division Duplex) 방식에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. TDD 방식은 한 프레임을 구성하는 하향 링크 및 상향 링크의 슬롯 수를 조절함으로써 비대칭적인 데이터 전송률을 가지는 서비스를 지원할 수 있으며, 채널의 Reciprocity 특성에 의하여 하향 링크 및 상향 링크의 채널 추정을 각각 따로 할 필요가 없다는 장점이 있다.

이동통신 시스템의 성능은 다중 경로 페이딩, 지연 확산 및 CCI에 의해 크게 영향을 받으며, 특히 OFDMA 시스템과 같은 경우에는 인접 셀로부터의 동일 채널 간섭이 시스템 성능 열화의 주된 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 OFDMA/TDD 시스템에 배열 안테나 기술을 적용하여 CCI 를 감소시킴으로서 상향 링크의 성능을 개선한다. 또한 하향 링크의 성능을 향상시키기 위하여 수신 배열 안테나의 적용을 위하여 상향 링크로부터 전송되는 파일럿 프리앰블 기간 동안 채널을 추정한다. 다음, 하향 링크 데이터 전송시에 송신 다이버시티 기법인 TxAA를 적용하였는데 이는 TDD 시스템의 특징인 채널의 Reciprocity 때문에 가능하다. 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 논문의 2장에서는 수신 빔형성을 위한 OFDMA/TDD 시스템의 상향링크

모델을 설명하며, 3장은 송신 빔형성을 위한 OFDMA/TDD 시스템의 하향링크 모델에 대하여 설명한다. 4장에서는 송신 및 수신 빔형성 기법이 적용된 OFDMA/TDD 시스템의 상향 링크 및 하향 링크 시뮬레이션 결과를 제시하며, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 수신 빔형성 기법이 적용된 OFDMA/TDD 시스템

그림 1은 수신 빔형성을 위해 배열 안테나가 적용된 OFDMA/TDD 시스템의 상향링크 모델에 해당한다^{1), 2)}. OFDMA 시스템의 송신단으로부터 전송되는 신호는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$s_{m,n} = \sum_{k=0}^{N-1} S_{m,k} e^{j2\pi kn/N}, \quad 0 \leq m \leq N-1 \quad (1)$$

여기서 N 은 서브캐리어의 수이고 $S_{m,k}$ 는 m 번째 OFDM 심볼의 n 번째 서브 캐리어로 전송되는 데이터 심볼을 나타낸다. 또한 시간 영역의 멀티 패스 채널은 아래의 식 (2) 와 같이 모델링할 수 있다.

$$\mathbf{h} = \sum_{l=0}^{L_s-1} a_l e^{j\theta_l} \mathbf{A}(\theta_l) \delta(t - \tau_l) \quad (2)$$

여기서 L_s 는 멀티패스의 수를 의미하고, $\mathbf{A}(\theta_l)$ 는 DoA (Direction of Arrival) 이 θ_l 인 l 번째 패스에 대한 Array Response Vector 이다. 수신되는 신호는 원하는 신호와 P 개의 co-channel 간섭 신호라고 가정할 때 아래의 식 (3)과 같이 표기할 수 있다.

$$\mathbf{r}_{m,n} = \sum_{l=0}^{L_s-1} \mathbf{h}_{m,l,n} \cdot S_{m,n-l} + \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{l=0}^{L_s-1} \mathbf{h}_{p,m,l,n}^i \cdot \mathbf{I}_{p,m,n-l} + \boldsymbol{\eta}_{m,n} \quad (3)$$

여기서 $\boldsymbol{\eta}_{m,n}$ 는 m 번째 OFDM 심볼의 n 번째 서브 캐리어의 AWGN 잡음 벡터를 의미하며, $\mathbf{h}_{p,m,l,n}^i$ 는 p 번째 co-channel 간섭에 해당하는 사용자의 m 번째 OFDM 심볼의 n 번째 서브캐리어의 멀티 패스 성분이다. 또한 $\mathbf{I}_{p,m,n}$ 은 p 번째 co-channel 간섭에 해당하는 사용자의 m 번째 OFDM 심볼의 n 번째 서브캐리어로 전송하는 심볼에 해당한다. 주파수 영역의 수신 신호는 아래의 식 (4)로 표기할 수 있다. 최종적으로 수신 신호로부터 데이터를 복원하기 위

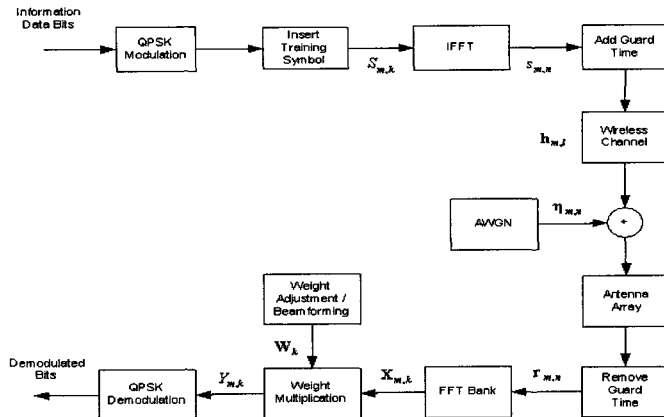


그림 1. 수신 빔형성 기법이 적용된 OFDMA/TDD 시스템의 상향링크 모델.
Fig. 1. Uplink Structure of OFDMA/TDD System for Receive Beamforming.

해서는 주파수 영역

$$X_{m,k} = \sum_{n=0}^{N-1} r_{m,n} e^{-j2\pi kn/N} \quad (4)$$

빔형성을 하여야 하며 결국 식 (5)로 표기할 수 있다.

$$Y_{m,k} = \mathbf{W}_k^H X_{m,k} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{W}_k 는 k 번째 안테나의 가중치 벡터에 해당한다. 그림 2는 수신 안테나를 적응시키기 위한 파일럿 구조이다³⁾. 위의 그림에서 Multi-frame 은 2개의 프레임으로 구성되어 있는데, 채널의 변화 상태에 따라 1개, 2개 또는 4개의 프레임을 포함하기도 한다. Multi-frame 상향 링크의 처음 8 슬롯 구간 동안은 프리앰블을 전송하여, 수신 안테나를 적응시킨다. 만약 채널의 상황이 Multi-frame 내에서 무시할 수 없을 정도로 변하는 경우에는, 수신 적응 안테나를 사용함으로써 얻는 이득이 미약하다. 따라서, 처음 8 슬롯 이후에는 OFDMA/TDD 시스템에서 데이터 전송 기간중에 기본적으로 제공하는 파일럿 서브 캐리어를 사용하여 채널을 보상한다.

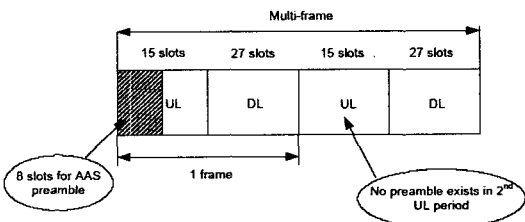


그림 2. 수신 빔형성 기법에 사용되는 프레임 구조.
Fig. 2. Frame Structure for Receive Beamforming.

수신 안테나를 채널의 상황에 따라 안테나 가중치를 변화시키기 위한 적응 알고리즘에는 여러가지가 있지만, 본 논문에서 사용하는 적응 알고리즘은 LMS, NLMS, RLS 알고리즘이며, 아래의 식 (6), (7), (8)은 각각의 알고리즘에 대한 수식이다⁴⁾.

2.1 LMS 알고리즘

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{w}}(n+1) &= \hat{\mathbf{w}}(n) + \mu \hat{\mathbf{x}}(n) e^*(n) \\ e(n) &= d(n) - \hat{\mathbf{w}}^H(n) \mathbf{x}(n) \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 NLMS 알고리즘

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{w}}(n+1) &= \hat{\mathbf{w}}(n) + \frac{\hat{\mu}}{a + \|\mathbf{x}(n)\|^2} \hat{\mathbf{x}}(n) e^*(n) \\ e(n) &= d(n) - \hat{\mathbf{w}}^H(n) \mathbf{x}(n) \end{aligned} \quad (7)$$

2.3 RLS 알고리즘

$$\begin{aligned} k(n) &= \frac{\lambda^{-1} \mathbf{P}(n-1) \mathbf{x}(n)}{1 + \lambda^{-1} \mathbf{x}^H(n) \mathbf{P}(n-1) \mathbf{x}(n)} \\ \mathbf{P}(n) &= \lambda^{-1} \mathbf{P}(n-1) - k(n) \mathbf{x}^H(n) \mathbf{P}(n-1) \\ \xi(n) &= d(n) - \hat{\mathbf{w}}^H(n-1) \mathbf{x}(n) \\ \hat{\mathbf{w}}(n) &= \hat{\mathbf{w}}(n-1) + k(n) \xi^*(n) \end{aligned} \quad (8)$$

III. 수신 빔형성을 위한 프리앰블을 이용하는 송신 빔형성 기법이 적용된 OFDMA/TDD 시스템

2절에서는 기지국의 배열 안테나 및 적응 알고리즘을 이용한 수신 빔형성 기법을 통하여 상향 링크의 성능을 향상시키는 방법을 기술하였다. 이번 장에서는 기지국의 배열 안테나 및 송신 다이버시티 기법을 사용하여 하향 링크의 성능을 개선하는 방

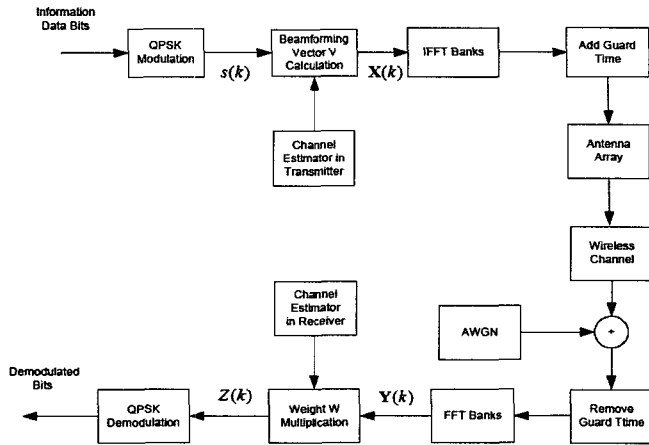


그림 3. 송신 빔형성 기법이 적용된 OFDMA/TDD 시스템의 하향링크 모델
 Fig. 3. Downlink Structure of OFDMA/TDD System for Transmit Beamforming.

법을 기술한다.

본 논문에서는 송신 다이버시티 기법 중에서 TxAA 빔형성 알고리즘⁵⁾을 OFDMA/TDD 시스템의 하향 링크에 적용하였다. 일반적으로 TxAA 빔형성 알고리즘을 사용하기 위하여, 송신단에서는 전송 안테나와 수신 안테나 간의 하향 링크 채널 행렬을 알아야 한다. 그러나 FDD 시스템의 경우에는 상향 및 하향 링크의 캐리어 주파수가 다르므로, 전송 안테나와 수신 안테나 간의 하향 링크 채널 행렬을 수신단 단말기가 계산한 후, 피드백 채널을 통하여 송신단에 전송하여야 하는 오버헤드가 발생한다. 그러나 TDD 시스템의 경우, 상향 및 하향링크의 캐리어 주파수가 같으므로 Reciprocity 특성을 가진다. 따라서 수신단에서 하향 링크의 채널 행렬을 따로 계산하여 송신단 측으로 전송할 필요가 없다.

본 논문에서는 상향 링크에서 배열 안테나를 적용시키기 위하여 전송되는 파일럿 프리엠블들을 사용하여, TxAA 빔형성 알고리즘에서 사용될 하향 링크의 채널 행렬을 추정한다. 그림 3은 송신 빔형성을 위해 전송 다이버시티 기법인 TxAA가 적용된 OFDMA/TDD 시스템의 하향링크 모델에 해당한다. M_T 개의 전송 안테나 및 M_R 개의 수신 안테나를 가지고 있다고 가정할 때, k 번째 서브캐리어를 통해 전송된 주파수 영역 신호는 식 (9)과 같다.

$$Y(k) = H(k)X(k) + N(k) \quad (9)$$

여기서, $H(k)$ 는 서브 캐리어 k 에 대한 $M_R \times M_T$ 채널 행렬, $N(k)$ 는 서브 캐리어 k 에 대한 $M_R \times$

1 잡음 벡터, 그리고 $X(k)$ 는 서브 캐리어 k 에 대한 $M_T \times 1$ 전송 신호 벡터에 해당된다. TxAA 시스템은 송신 안테나의 서브 캐리어로 전송되는 신호를 아래의 식 (10)과 같이 송신 빔형성한다.

$$X(k) = V(k)s(k) \quad (10)$$

여기서, $V(k)$ 는 서브 캐리어 k 에 대한 $M_T \times 1$ 빔형성 벡터에 해당하며, $s(k)$ 는 서브 캐리어 k 로 전송되는 심볼로서 일반적으로 QPSK, QAM 등으로 변조된다. 따라서 서브 캐리어 k 에 대한 수신 신호는 아래의 식 (11) 으로 다시 표현 가능하다.

$$Y(k) = H(k)X(k) + N(k) = H(k)V(k)s(k) + N(k) \quad (11)$$

하향 링크 수신신호의 선형 결합을 위하여, 수신단에서는 각각의 서브 캐리어 별로 다음과 같은 계산을 수행한다.

$$Z(k) = W^H(k)Y(k) \quad (12)$$

송신단의 빔형성 벡터와 수신단의 기중치는 다음과 같이 구할 수 있다. 서브 캐리어 k 에 대하여 $M_R \times M_T$ 채널 행렬의 SVD(Singular Value Decomposition)는 아래와 같다.

$$H(k) = U_H(k)S_H(k)Z_H^H(k) \quad (13)$$

여기서, $U_H(k)$ 는 $M_R \times M_R$ 이고, $Z_H(k)$ 는 $M_T \times M_T$ 인 Unitary 행렬이다. 그리고 $S_H(k)$ 는 $M_R \times$

M_T 행렬인데, upper left $r_H \times r_H$ 부분만 값을 가지며, 나머지는 모두 0을 가지는 행렬이다. 여기서 r_H 는 채널의 rank이다. 수신 안테나의 k 번째 서브캐리어의 SNR을 최대로 하기 위해서는 전송 빔형성 벡터 $V(k)$ 를 식 (14)와 같이 선정하여야 한다.

$$V(k) = Z_{H1}(k) \tag{14}$$

여기서, $Z_{R1}(k)$ 은 $Z_H(k)$ 의 첫번째 열에 해당되는 벡터이다. 또한 수신단의 가중치 벡터는 아래와 식 (15)와 같이 선정된다. 여기서, σ_n^2 과 σ_s^2 는 수신단의 잡음 및 전송 신호의 분산 값이다.

$$W(k) = \frac{H(k)V(k)}{V^H(k)H^H(k)H(k)V(k) + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2}} \tag{15}$$

IV. 시뮬레이션 환경 및 성능 분석

아래 표 1은 송신 및 수신 빔형성 기법이 적용된 OFDMA/TDD 시스템의 성능을 시뮬레이션하기 위한 기본 파라미터에 해당된다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터.
Table 1. Simulation Parameter

Parameters	Value
Center Frequency	2.3GHz
Sampling Frequency	10MHz
Number of Subcarriers	1024
Number of Effective Subcarriers	768
Number of Pilot Subcarriers	96
Cyclic Prefix	128
OFDMA Symbol Duration	115.2 us
TDD Frame Duration	5 ms
DL slots / Frame	27
UL slots / Frame	15
Modulation	QPSK
Wireless Channel	Ped B 10km / h
Tx /Rx Antenna Configuration of Base Station	8 elements ULA (Uniform Linear Array)
Tx /Rx Antenna Configuration of Subscriber Station	1 element

그림 4는 동일 채널 간섭이 없는 Ped B 10km/h Rayleigh fading의 경우, 배열 안테나와 적응 알고리즘을 이용하여 수신 빔형성을 한 시스템의 성능과 단일 안테나 시스템의 상향 링크 성능을 비교한다. 동일 채널 간섭이 없으면, LMS, NLMS, RLS 적응 알고리즘의 성능이 비슷하며, 단일 안테나 시

스템에 비하여 10^{-3} BER에서 9dB 정도 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있으며 이는 안테나 어레이 이득에 해당한다.

그림 5는 동일 채널 간섭이 존재하며 Ped B 10km/h Rayleigh fading인 경우, 배열 안테나 및 적응 알고리즘을 이용하여 수신 빔형성을 하는 경우 상향링크 Uncoded BER 성능 곡선이다. E_b/N_0 가 6dB 인 경우에 동일 채널을 사용하는 사용자가 증가함에 따라 RLS 적응 알고리즘을 사용한 수신 빔형성 기법이 가장 좋은 성능을 나타내며, 그리고 NLMS, LMS 알고리즘의 순으로 동일 채널 간섭 성능이 열화됨을 알 수 있는데는 RLS 알고리즘이 NLMS, LMS 알고리즘에 비하여 ICI에 의한 잡음

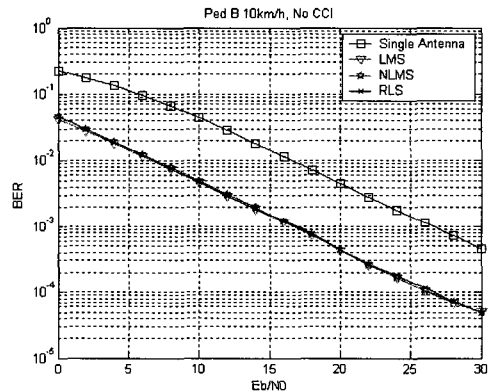


그림 4. 동일 채널 간섭이 없는 경우, Ped B 10km/h에서 적응 알고리즘 별 BER 성능 곡선.(OFDMA/TDD Uplink)
Fig. 4. Uncoded BER Performance of Adaptive Array in Ped B 10km/h channel without co-channel interference. (OFDMA/TDD Uplink)

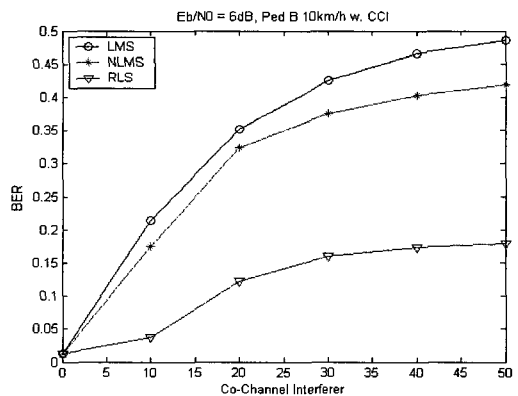


그림 5. 동일 채널 간섭이 있는 경우, Ped B 10km/h에서 적응 알고리즘 별 상향 링크 Uncoded BER 성능곡선.(OFDMA/TDD Uplink)
Fig. 5. Uncoded BER Performance of Adaptive Array in Ped B 10km/h channel with co-channel interference. (OFDMA/TDD Uplink)

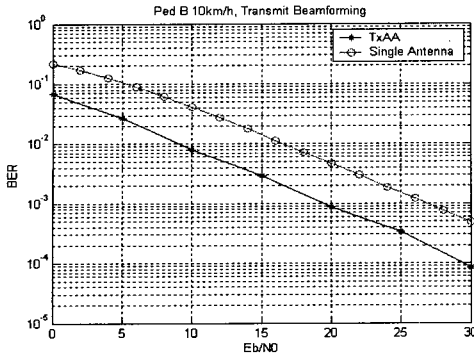


그림 6. TxAA 송신 빔형성 기법을 적용한 경우, Ped B 10km/h 에서 하향 링크 Uncoded BER 성능 곡선. (OFDMA/TDD Downlink)
 Fig. 6. Uncoded BER Performance of TxAA Transmit Beamforming technique in Ped B 10km/h channel. (OFDMA/TDD Downlink)

성분에 더 강인하기 때문이다.

그림 6은 Ped B 10km/h 에서 상향링크에서 수신 빔형성하면서 얻은 채널 정보를 이용하여, 송신 빔형성 알고리즘으로서 TxAA 를 OFDMA/TDD 시스템에 적용한 경우, 하향 링크 uncoded BER 성능 곡선이다. 단일 안테나 시스템에 비하여, 10^{-3} BER 에서 약 7 dB 정도 성능이 향상됨을 알 수 있으나 송신 전력의 제약으로 인하여 동일한 개수의 안테나를 이용하여 수신 빔형성 알고리즘을 적용한 경우보다는 성능이 열화됨을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 OFDMA/TDD 시스템의 상향 및 하향 링크 성능을 향상시키기 위하여, 배열 안테나 및 적응 알고리즘을 이용하는 수신 빔형성 기법을 상향 링크에 적용하였으며, TDD 방식의 Reciprocity 특성을 이용하여 수신 빔형성 과정에서 채널을 추정한 후, 이를 이용하여 TxAA 송신 빔형성 알고리즘을 하향 링크에 적용하였다. 시뮬레이션 결과에 의하면 단일 안테나 시스템에 비하여 10^{-3} BER 에서 상향 링크는 약 9dB, 하향 링크는 약 7dB 정도의 성능 향상이 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

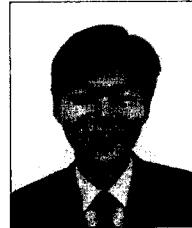
[1] B. L. P. Cheung, Simulation of Adaptive Array Algorithms for OFDM and Adaptive Vector OFDM Systems, Master of Science in Electrical Engineering of Virginia Polytech.,

Sept. 2002.

[2] H. Matsuoka and H. Shoki, "Comparison of pre-FFT and post-FFT processing adaptive arrays for OFDM systems in the presence of co-channel interference", in proc. IEEE PIMRC, Sept. 2003, vol. 2, pp. 1603-1607.
 [3] IEEE P802.16-REVd/D5, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems., Mar. 2004.
 [4] K. S. Chang, K. H. Chang and Y. N. Han, "Convergence behavior of TRB algorithms in Wideband CDMA systems", in Proc. IEEE TENCON, Sept. 1999, vol. 1, pp. 554-556.
 [5] F. W. Vook, T. A. Thomas, and X. Zhuang, "Transmit diversity and transmit adaptive arrays for broadband mobile OFDM systems", in Proc. IEEE WCNC, Mar. 2003, vol. 1, pp. 6-9.

허 주 (Joo Heo)

준회원



2002년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학사)
 2004년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학석사)
 2004년 3월~현재 인하대학교 정보통신대학원 박사과정
 <관심분야> 4세대 이동통신 무선전송방식, Smart Antenna and MIMO, Radio Resource Management, Cross-layer Design

장 경 희 (KyungHi Chang)

종신회원



1985년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1987년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 8월 Texas A & M Univ., EE Dept. (Ph.D.)
 1989년~1990년 삼성종합기술원

주임연구원

1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구소 무선전송방식연구팀장 (책임연구원)
 2003년~현재 인하대학교 정보통신대학원 부교수
 <관심분야> 4세대 이동통신 무선전송방식, WRAN 시스템 무선전송기술, Cognitive Radio, Cross-layer Design