

광대역 부호분할다원접속(WCDMA) 이동통신 환경하에서 송수신 다이버시티 기법의 성능 분석

박상조*, 노용우**

Performance Analysis of the Open Loop Transmitter and Receiver Diversity in the Wide Band CDMA network

SangJo Park *, Yongwoo Roh **

요 약

현재 이동통신 시장이 급성장하고 있으며 무선통신 환경에서의 다양한 멀티미디어 서비스의 요구에 부합하고 한정된 주파수를 효율적으로 사용하기 위하여, 데이터 전송의 고속화가 가능하고 다중 안테나를 이용하는 3세대 이동통신 표준화가 진행되고 있다. 본 논문에서는 3세대 이동통신 표준화 기구인 3GPP에서 다루어지는 개루프 송신 다이버시티 기법 중 STTD(Space Time Transmit Diversity) 기법 및 STTD를 기본으로 확장되어진 STTD-OTD, CL-STTD 그리고 4TX-STTD 들에 대한 성능을 분석한다. 그리고 각 기법에서 수신 다이버시티를 추가한 개루프 송신 및 수신 다이버시티 기법을 제안한다. 플랫 페이딩 채널 환경하에서 이들 기법들을 적용하여 모의 수치계산을 수행하고 성능을 비교 분석한다.

Abstract

The standardization of third Generation Partnership Project(3GPP) has been performed in order to support interactive multimedia services under mobile environments. In this 3GPP, transmit diversity solutions are applied to increase the available diversity effectively using 2 or more antennas. In this paper, we analyzer the performances on STTD(Space Time Transmit Diversity) technique and its modified techniques such as STTD-OTD, CL-STTD, and 4TX-STTD out of open loop transmit diversities that the standardization of 3GPP has released. We also propose the open loop transmitter and receiver diversities to add the receiver diversity. We analyze and discuss the performance of the proposed techniques and using the Matlab simulation under the flat fading channel environment.

▶ Keyword : 3GPP, open loop transmit diversity, space time block coding, STTD, MIMO

• 제1저자 : 박상조
• 접수일 : 2006.01.20, 심사완료일 : 2006.03.10
* 서원대학교 교수, ** UTStarcom korea

1. 서론

현재 무선 이동통신 시장이 급성장하고 무선 환경에서의 다양한 멀티미디어 서비스가 요구되어지고 있으며, 동시에 전송 데이터의 대용량화 및 데이터 전송의 고속화가 진행되고 있다. 따라서 한정된 주파수를 효율적으로 사용할 수 있는 방법을 찾는 것이 가장 시급한 과제로 떠오르고 있으며, 이 과제를 해결하기 위해서는 다중 안테나를 이용한 새로운 전송 기술을 필요로 하고 있다.

한편 사용자의 요구 사항과 기관들이 제시하는 IMT (International Mobile Telecommunication) 2000의 목표와 요구 사항의 현격한 차이로 인해, IMT 2000 시스템은 사용자의 초고속 이동 통신 서비스 요구에 대한 서비스 제공에 한계가 있을 것으로 예측하여 3세대, 4세대 이동 통신 개발의 필요성이 제시되었고 이에 "beyond IMT 2000" 시스템에 대한 전문화된 기술이 요구되고 있는 실정이다 [1].

현재 이동 통신 시스템은 제한된 주파수 자원을 이용하여 고용량 멀티미디어 데이터 전송을 목표로 다양한 송수신 방식들이 대두되고 있으며, 이들 중 3GPP(3rd Generation Partnership Project) 비동기식 IMT 2000 시스템을 기반으로 2개 이상의 송신 안테나를 이용하여 전송 품질을 향상하는 전송 다이버시티 (Tx Diversity) 기법에 대한 개선 방안이 지속적으로 연구되고 있다 [2]~[5]. 3세대 이동통신 표준화 기구인 3GPP에서는 이동 통신 환경에서 다수의 안테나를 사용하여 데이터를 송/수신하는 다중 안테나 신호처리(MIMO: Multiple Input Multiple Output) 기술이 제안되었다 [6]. 3GPP에서 다루지고 있는 다중 안테나 기술들 중 3세대 이동통신 시스템의 표준인 W(Wide band) CDMA에서 사용되는 송신 다이버시티 기법으로, 귀환 데이터의 유/무에 따라서 페루프 송신 다이버시티와 개루프 송신 다이버시티로 각각 나눈다. 페루프 송신기법은 안테나별 데이터의 전송 속도를 가변적으로 변화시켜 환경에서 데이터의 전송량을 극대화하는 방법과 측정된 채널의 정보를 보다 효율적으로 피드백 하는 방법으로 신뢰성을 높일 수 있지만, 다이버시티 효과를 얻을 수 없다.

한편 개루프 송신 다이버시티 방법으로는 시간축 상에서 주로 적용되었던 채널 부호화기법을 공간상으로 확장시킨 시공간 블록부호화(Space Time Block Coding)를 통해 다이버시티 효과를 얻는 STTD(Space Time Transmit Diversity)가 제안되고 있다[3]. STTD 방식은 귀환 신호가 필요 없으므로 채널 변화속도에 따른 성능변화가 없는 장점이 있으므로 다이버시티 효과를 나타낼 수 있다. 그리

고 기존의 STTD 기법을 기본으로 하는 확장된 STTD 기법인 4TX-STTD(4 Transmit Antenna STTD), STTD-OTD(STTD-Orthogonal Transmit Diversity)가 제안되었다 [6]~[9].

본 논문에서는 3세대 이동통신 표준화 기구인 3GPP에서 제안한 송신 다이버시티 기법 중 개루프 송신 다이버시티 방법인 STTD, 4TX-STTD 및 STTD-OTD 기법의 성능을 분석하고자 한다 [10][11]. 그리고 개루프 송신 다이버시티 방법을 기본으로 수신 안테나를 2개 사용하여 수신 다이버시티 기법을 적용시킨 개루프 송신 및 수신 다이버시티 방법을 제안하여 성능을 분석한다. 개루프 송신 및 수신 다이버시티 방법은 외관상으로는 송수신안테나를 다수 사용한다는 점에서 MIMO 시스템[6]과 유사하나, 제안 시스템은 다중의 송신안테나에서 동일 데이터를 전송하는 시스템인 반면, MIMO 시스템은 서로 다른 데이터를 동시에 전송하여 고속의 전송속도를 필요로 한다는 점이다. 플랫폼 채널 환경하에서 이들 기법들을 적용하여, 모의실험을 수행하고 시스템 성능 결과를 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 2장에서는 개루프 송신 다이버시티 방법을 분석하고, 이에 기반한 확장된 형태의 송신 및 수신 다이버시티 기법을 제안하여 3장에 성능을 분석한다. 4장에서는 각 기법들의 성능을 시뮬레이션을 통하여 분석하고, 4장에서는 결론을 맺도록 한다.

II. 개루프 송신 다이버시티 기법

2.1 STTD (Space-Time Transmit Diversity) 송신 다이버시티 기법 [6][8]

1) 2개 송신 STTD (STTD 2x1)

(그림 1)은 두 개의 송신 안테나를 사용할 때 일반적인 시공간 블록 코드 (Space-Time Block Code: STBC) 를 적용하는 송/수신기의 구조를 나타낸다.

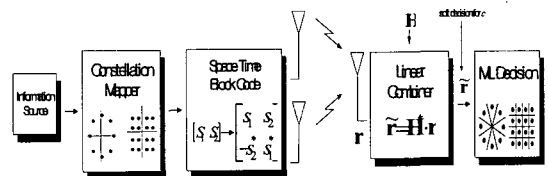


그림 1. 2개 송수신 STTD의 구조
Fig 1. Configuration of 2 TX-STTD

시공간 블록 인코더로 입력되는 심벌들은 두 심벌 단위로 블록화 되고, 이들 두 심벌 c_1, c_2 는 전송율의 변화 없이 시공간 블록 코딩 되어 두 개의 전송 안테나를 통해 동시에 전송되게 된다. 첫 번째 심벌 시간에서는 송신 안테나 1을 통해서 c_1 을, 송신 안테나 2를 통해서 c_2 를 전송하게 된다. 다음 심벌 시간에서는 송신 안테나 1을 통해서 $-c_2^*$ 를, 송신 안테나 2를 통해서 c_1^* 를 전송하게 된다. 첫 번째와 두 번째 송신 안테나에서 수신단의 단일 안테나로 전송될 때의 채널 성분을 각각 h_1 과 h_2 라 놓으면, 시간상 연속적으로 수신된 심벌 r_1 과 r_2 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} r_1 &= c_1 h_1 + c_2 h_2 + n_1 \\ r_2 &= -c_2^* h_1 + c_1^* h_2 + n_2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 n_1 과 n_2 는 잡음이고 전력밀도가 $\frac{N_0}{2}$ 인 복소 가우시안 랜덤변수인 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이다. 수신된 신호 벡터가 $\vec{r} = [r_1 \ r_2]^T$ 이고, 코드 심벌 벡터가 $\vec{c} = [c_1 \ c_2]^T$ 이며, 잡음 벡터가 $\vec{n} = [n_1 \ n_2]^T$ 로 정의될 때, 행렬 형태로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{r} = \mathbb{H} \cdot \vec{c} + \vec{n} \quad (2)$$

여기서 행렬 \vec{H} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbb{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

모든 가능한 심벌쌍 $\vec{c} = c_1, c_2$ 의 집합을 C로 정의하면, 모든 심벌쌍들은 발생 확률이 같고, 잡음 벡터 \vec{n} 는 다변수 AWGN이라고 가정되기 때문에 ML(Maximum Likelihood) 방법에 의해 송신 심벌들을 식 (4)와 (그림 2)와 같이 검출 할 수 있다. (그림 2)는 시공간 블록 코딩 적용시의 수신기 구조를 나타낸다.

$$\hat{c} = \arg \min | \vec{r} - \mathbb{H} \cdot \vec{c} | \quad (4)$$

여기서 $\mathbb{H}^* \mathbb{H} = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot \mathbb{I}_2$ 이고, \mathbb{I}_2 는 2*2 크기의 단위 행렬이다. 수신단에서 채널 상태 정보를 완전히 알고

있다고 가정하면, 수정된 신호 벡터 \vec{r} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{r} = \mathbb{H}^* \cdot \vec{r} = (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot \vec{c} + \vec{n} \quad (5)$$

여기서 $\vec{n} = \mathbb{H}^* \cdot \vec{n}$ 이다.

디코딩 방법은 다음과 같이 간단히 표현 될 수 있다.

$$\hat{c} = \arg \min | \vec{r} - (|h_1|^2 + |h_2|^2) \cdot \vec{c} |^2 \quad (6)$$

여기서 \vec{n} 의 요소들은 독립적이고 같은 분포를 갖는다는 성질을 만족하면, c_1 과 c_2 의 디코딩 방법은 식 (6)과 같이 간단한 선형 조합을 통해서 쉽게 얻을 수 있다.

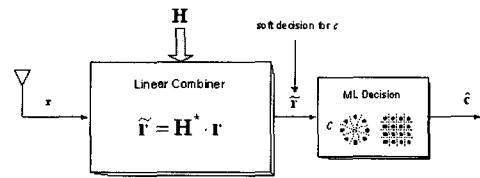


그림 2. 시공간 블록 코딩 적용시의 수신기 구조
Fig 2. Configuration of receiver using STBC

2) 3개 송신 STTD (STTD 3x1)

2개 송신 STTD기법을 송신 안테나의 개수를 3개로 확장하는 방법으로서, 동일한 심벌 구간에서 3개의 안테나를 사용함으로써 다이버시티 효과를 나타낸다. [5]에서 제안된 3개의 송신 안테나를 위한 STBC (space-time block code)를 통해 풀 다이버시티가 가능하다. 3개의 송신 안테나를 위한 시공간 블록 코드는 <표 1>과 같다.

표 1. 3개의 송신 안테나를 위한 시공간 블록 코드
Table 1. STBC for 3 TX antennas

	Ant #1	Ant #2	Ant #3	Ant #4
Slot #1	S_1	S_2	S_3	0
Slot #2	$-S_2^*$	S_1^*	0	$-S_3$
Slot #3	$-S_3^*$	0	S_1^*	S_2
Slot #4	0	S_3^*	$-S_2^*$	S_1

4개의 안테나를 사용하지만 동일한 시간 슬롯 동안에는 단지 3개의 안테나를 통하여 신호를 전송함을 알 수 있다.

시공간 부호화된 3개의 심벌들은 동일한 시간 슬롯동안 3개의 송신 안테나를 통해 4 슬롯 시간 동안 전송된다. 이로부터 수신단의 단일 안테나에서 얻어지는 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_1 &= s_1h_1 + s_2h_2 + s_3h_3 + n_1 \\ r_2 &= -s_2^*h_1 + s_1^*h_2 - s_3h_4 + n_2 \\ r_3 &= -s_3^*h_1 + s_1^*h_3 + s_2h_4 + n_3 \\ r_4 &= s_3^*h_2 - s_2^*h_3 + s_1h_4 + n_4 \end{aligned} \dots\dots\dots(7),$$

여기서 $r_i(i=1,\dots,4)$ 는 4 슬롯동안 수신된 신호, $h_j(j=1,\dots,4)$ 는 각각의 송신 안테나와 수신단 단일 안테나 간의 채널을 의미한다. 그리고 $n_l(l=1,\dots,4)$ 은 가우시안 잡음을 나타낸다. 수신 신호로부터 다음과 같은 복호화 과정을 수행한 후, 송신된 심벌들을 추정하게 된다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &= r_1h_1^* + r_2^*h_2 + r_3^*h_3 + r_4^*h_4 \\ \hat{s}_2 &= r_1h_2^* - r_2^*h_1 + r_3^*h_4 - r_4^*h_3 \\ \hat{s}_3 &= r_1h_3^* - r_2^*h_4 - r_3^*h_1 + r_4^*h_2 \end{aligned} \dots\dots\dots(8),$$

여기서 $\hat{s}_j(j=1,\dots,3)$ 는 송신 심벌 s_j 의 추정치를 의미한다. 이렇게 추정된 심벌 \hat{s}_j 를 가지고, 식 (6)과 동일한 방법을 적용하여 최종 심벌을 검출한다.

3) 4개 송신 STTD

STTD기법을 non-orthogonal 한 하나의 방법으로서 송신 안테나의 수를 4개로 확장하는 기법이다. Phase hopping STTD 라 명명하기도 하는 이 기법은 <표 2>와 같은 형태의 시공간 블록을 구성한다.

표 2. "Trombi" 코드 구성
Table 2. "Trombi".code

	Ant #1	Ant #2	Ant #3	Ant #4
Slot #1	S_1	S_2	$S_1e^{j\phi}$	$S_2e^{j\phi}$
Slot #2	$-S_2^*$	S_1^*	$-S_2^*e^{j\phi}$	$S_1^*e^{j\phi}$
Slot #3	S_3	S_4	$S_3e^{j\psi}$	$S_4e^{j\psi}$
Slot #4	$-S_4^*$	S_3^*	$-S_4^*e^{j\psi}$	$S_3^*e^{j\psi}$

<표 2>를 보면 Alamouti 코드 두 쌍과 pseudo-random phases를 함께 더함으로써 생성하는데, 이와 같은 코드 구성을 "Trombi"라고 부르기도 한다. 다음 절에 논의 될 4Tx-STTD기법과 비교할 때 같은 수인 4개의 송신 안테나를 사용하지만 4Tx-STTD기법이 2 개의 심벌을 전송하는

것과는 달리 "Trombi"기법은 4 개의 심벌을 전송한다는 점에서 차이가 있다. 시공간 부호화된 4 개의 심벌들은 동일한 시간 슬롯동안 4개의 송신 안테나를 통해 4 슬롯 시간 동안 전송된다. 이로부터 수신단 단일 안테나에서 얻어지는 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_1 &= s_1h_1 + s_2h_2 + s_1e^{j\phi}h_3 + s_2e^{j\phi}h_4 + n_1 \\ r_2 &= -s_2^*h_1 + s_1^*h_2 - s_2^*e^{j\phi}h_3 + s_1^*e^{j\phi}h_4 + n_2 \\ r_3 &= s_3h_1 + s_4h_2 + s_3e^{j\psi}h_3 + s_4e^{j\psi}h_4 + n_3 \\ r_4 &= -s_4^*h_1 + s_3^*h_2 - s_4^*e^{j\psi}h_3 + s_3^*e^{j\psi}h_4 + n_4 \end{aligned} \dots\dots\dots(9)$$

식 (9)에서 $r_i(i=1,\dots,4)$ 는 4 슬롯동안 수신된 신호, $h_j(j=1,\dots,4)$ 는 각각의 송신 안테나와 수신단 단일 안테나 간의 채널을 의미한다. 그리고 $n_l(l=1,\dots,4)$ 은 가우시안 잡음을 나타낸다. 식 (9)의 수신 신호로부터 식 (10)과 같은 복호화 과정을 수행한 후, 송신된 심벌들을 추정하게 된다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &= r_1h_1^* + r_1(e^{j\phi}h_3)^* + r_2^*h_2 + r_2^*(e^{j\phi}h_4) \\ \hat{s}_2 &= r_1h_2^* + r_1(e^{j\phi}h_4)^* - r_2^*h_1 - r_2^*(e^{j\phi}h_3) \\ \hat{s}_3 &= r_3h_1^* + r_3(e^{j\psi}h_3)^* + r_4^*h_2 + r_4^*(e^{j\psi}h_4) \\ \hat{s}_4 &= r_3h_2^* + r_3(e^{j\psi}h_4)^* - r_4^*h_1 - r_4^*(e^{j\psi}h_3) \end{aligned} \dots\dots\dots(10)$$

식 (10)에서 $\hat{s}_j(j=1,\dots,3)$ 는 송신 심벌 s_j 의 추정치를 의미한다. 이렇게 추정된 심벌 \hat{s}_j 를 가지고, 식 (6)과 동일한 방법을 적용하여 최종 심벌을 검출한다.

2.2 Tx-STTD(4 Transmit Antenna STTD) 송신 다이버시티 기법

4 Tx-STTD 기법(4 Tx-STTD 4x1)은 송신 안테나 2개를 이용하는 기존의 STTD 기법을 4개의 송신 안테나로 확장한 기법이다 [9]. 이 때 전송되는 심벌은 STTD 기법과 동일한 두 심벌을 이용한다. 기존의 STTD 기법과 비교하는 경우, 단지 각각의 심벌을 2개의 송신 안테나를 이용하여 전송하는 기법이다. (그림 3)은 4 Tx-STTD 기법을 적용한 송신기 구조를 보여준다. 여기서 시공간 부호화 과정은 송신 안테나 2개를 이용하는 STTD 기법에서의 부호화 과정과 동일하다. 부호화된 심벌들은 첫 슬롯 시간동안 송신 안테나 1을 통해서 심벌 s_1 이 전송되며, 송신 안테나 1을 통해 전송된 심벌 s_1 을 이용하여 위상만 변환된 형태의 동일한 심벌이 송신 안테나 2를 통해 전송된다. 위와 동일한 방법으로 송신 안테나 3을 통해 심벌 s_2 가 전송되고, 위상만 변환된 심벌 s_2 가 안테나 4를 통해 전송된다. 다음 슬롯 시간 동안에는

송신 안테나 1과 2를 통해 심벌 $-s_2^*$ 와 위상만 변환된 $-s_2^*$ 가 각각 전송되고, 송신 안테나 3과 4를 통해 심벌 s_1^* 와 위상만 변환된 심벌 s_1^* 가 각각 전송된다. 송신 안테나 2와 4에 적용되는 위상 호핑 패턴은 다음과 같다.

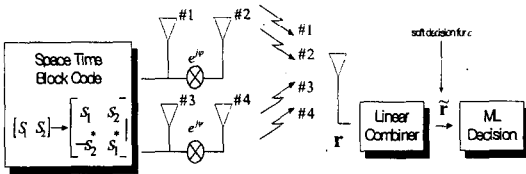


그림 3. 4 Tx-STTD 기법을 적용한 송·수신기 구조
Fig 3. Configuration of receiver and transmitter using 4 Tx-STTD

먼저 송신 안테나 2에 적용되는 주기적인 위상 이동 패턴은 (그림 4)에서 보여주고 있다. 최적의 위상차 상태를 가지는 패턴에 따른 송신 안테나 2에 적용되는 위상값은 $0^\circ, 135^\circ, 270^\circ, 45^\circ, 180^\circ, 315^\circ, 90^\circ, 225^\circ$ 의 값을 가진다. 그리고 송신 안테나에 4에 적용되는 위상값은 송신 안테나 2에 적용되는 위상값과 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$\Psi = \Phi - \pi \tag{11}$$

Ψ 는 송신 안테나 4에 적용되는 위상값, Φ 는 송신 안테나 2에 적용되는 위상값을 의미한다. 그리고 위상값들을 송신 안테나에 적용할 때 두 심벌 전송 구간 동안에는 동일한 위상이 각각 유지되어야 한다.

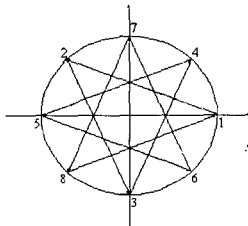


그림 4. 최적의 위상차 상태
Fig 4. State of optimal phase difference

두 개의 슬롯 구간동안 전송된 심벌 s_1, s_2 가 4개의 송신 안테나를 거쳐서 수신단의 단일 안테나에 수신된 신호는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$r_1 = s_1 h_1 + s_1 e^{j\phi} h_2 + s_2 h_3 + s_2 e^{j\psi} h_4 + n_1 \dots (12)$$

$$r_2 = -s_2^* h_1 - s_2^* e^{j\phi} h_2 + s_1^* h_3 + s_1^* e^{j\psi} h_4 + n_2$$

식(14)에서 기존의 2개의 송신 안테나를 이용하는 STTD와 거의 유사한 형태의 심벌 복호화 과정을 거쳐게 되면 식 (15)와 같이 추정 심벌을 얻게 된다.

$$\hat{s}_1 = r_1 h_1^* + r_1 (e^{j\phi} h_2)^* + r_2^* h_3 + r_2^* (e^{j\psi} h_4) \dots (13)$$

$$\hat{s}_2 = r_1 h_3^* + r_1 (e^{j\phi} h_4)^* - r_2^* h_1 - r_2^* (e^{j\psi} h_2)$$

식 (13)을 통해 얻어진 추정 심벌을 이용하여 식 (6)과 동일한 방법을 적용, 식 (14)를 통해 최종 심벌을 검출한다.

$$\hat{s} = \arg \min | \tilde{s} - (|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2) \cdot \vec{s} |^2 \tag{14}$$

2.3 STTD-OTD (STTD-Orthogonal Transmit Diversity) (STTD-OTD 4x1)

3GPP의 W-CDMA 시스템용 개방 루프 전송 다이버시티 기법으로 제안되었던 두 개 송신 안테나를 사용하는 STTD 기법과 OTD (Orthogonal Transmit Diversity) 기법을 결합하고, 4개의 송신 안테나로 확장한 형태의 전송 다이버시티 기법이다(7). (그림 5)는 STTD-OTD기법을 위한 간단한 형태의 송신기의 구조이다. 연속적인 송신 데이터 심벌 s_1, s_2, s_3, s_4 들이 있다고 가정한다. 먼저 그림 5의 송신기에서 보면 입력 신호 스트림에 대해 입력되는 순서를 바꾸기 위한 심벌 레벨 스캐램블링을 수행한다.

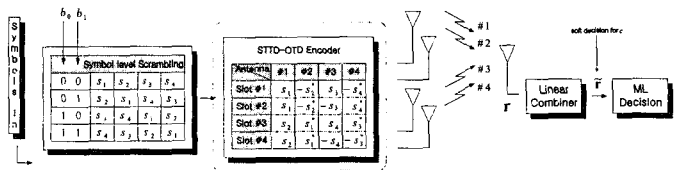


그림 5. STTD-OTD를 위한 송수신기 구조
Fig 5. Configuration of Rx and Tx for STTD-OTD

이를 위해 비트 b_0, b_1 의 조합에 따른 입력 심벌 s_1, s_2, s_3, s_4 의 스캐램블링 순서를 결정한다. 비트 b_0, b_1 의 조합은 Long PN 코드를 이용하여 구해진다. 이러한 심벌 레벨 스캐램블링은 STTD-OTD 시공간 부호화 과정 전에 행해진다. <표 3>은 비트 b_0, b_1 의 조합에 의해 생성되는 심벌 시퀀스를 보여준다.

표 3. 심벌 레벨 스크램블러
Table 3. Symbol-level scrambler

b_0	b_1	Symbol Sequence
0	0	$S_1 S_2 S_3 S_4$
0	1	$S_2 S_1 S_4 S_3$
1	0	$S_3 S_4 S_1 S_2$
1	1	$S_4 S_3 S_2 S_1$

	Ant #1	Ant #2	Ant #3	Ant #4
Slot #1	S_1	$-S_2^*$	S_3	$-S_4^*$
Slot #2	S_1	$-S_2^*$	$-S_3$	S_4^*
Slot #3	S_2	S_1^*	S_4	S_3^*
Slot #4	S_2	S_1^*	$-S_4$	$-S_3^*$

〈표 4〉는 비트 b_0, b_1 의 조합이 각각 0이라 가정한 경우, 이에 해당하는 심벌 시퀀스 s_1, s_2, s_3, s_4 에 대해 시공간 부호화된 심벌들을 보여준다. 시공간 부호화된 4개의 심벌들은 4개의 송신 안테나를 통해 4 슬롯 시간 동안 전송된다. 이로부터 수신단 단일 안테나에서 얻어지는 수신 신호는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned}
 r_1 &= s_1 h_1 - s_2^* h_2 + s_3 h_3 - s_4^* h_4 + n_1 \\
 r_2 &= s_1 h_1 - s_2^* h_2 - s_3 h_3 + s_4^* h_4 + n_2 \\
 r_3 &= s_2 h_1 + s_1^* h_2 + s_4 h_3 + s_3^* h_4 + n_3 \\
 r_4 &= s_2 h_1 + s_1^* h_2 - s_4 h_3 - s_3^* h_4 + n_4
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots(15)$$

여기서 $r_i (i=1, \dots, 4)$ 는 4슬롯동안 수신된 신호, $h_j (j=1, \dots, 4)$ 는 각각의 송신 안테나와 수신단 단일 안테나간의 채널을 의미한다. 그리고 $n_l (l=1, \dots, 4)$ 은 가우시안 잡음을 나타낸다. 수신 신호로부터 복호화 과정을 수행한 후, 송신된 심벌들을 추정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \hat{s}_1 &= r_1 h_1^* + r_2 h_1^* + r_3^* h_2 + r_4^* h_2 \\
 \hat{s}_2 &= -r_1^* h_2 - r_2^* h_2 + r_3 h_1^* + r_4 h_1^* \\
 \hat{s}_3 &= r_1 h_3^* - r_2 h_3^* + r_3^* h_4 - r_4^* h_4 \\
 \hat{s}_4 &= -r_1^* h_4 + r_2^* h_4 + r_3 h_3^* - r_4 h_3^*
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots(16)$$

여기서 $\hat{s}_j (j=1, \dots, 4)$ 는 송신 심벌 s_j 의 추정치를 의미한다. 이렇게 추정된 심벌 \hat{s}_j 를 가지고, 식 (6)과 동일한 방법을 적용하여, 최종 심벌을 다음과 같이 검출한다.

$$\hat{s} = \arg \min_{\tilde{s}} \{ |\tilde{s} - (|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2) \cdot \tilde{s} |^2 \}
 \dots\dots(17)$$

표 4. $b_0=b_1=0$ 일 때의 인코딩 심벌
Table 4. encoding symbol for $b_0=b_1=0$

2.4 STTD-OTD + TSTD 송신 다이버시티 기법

동일한 두개의 STTD-OTD시스템과 TSTD 시스템이 결합된 형태를 취하게 되며, 주기적인 스위칭에 따른 하나의 시스템 선택후의 동작은 기존의 STTD-OTD 시스템의 동작과 동일하다. 먼저 송신기에서는 연속적인 4개의 송신 데이터 심벌들이 〈표 3〉에서 보여주는 스크램블러를 통하여 입력되는 심벌 순서가 바뀌게 되고 〈표 4〉의 시공간 부호화 과정을 거친 후 4개의 송신 안테나를 거쳐 전송된다. 이 때 두 개의 동일한 동작을 수행하는 시스템이 주기적인 스위칭에 따라 선택되어 입력 심벌들이 일정 슬롯 구간동안 두 번 전송되어 진다. (그림 6)은 STTD-OTD+TSTD를 위한 송신기 구조이다.

수신기에서는 송신기에서의 동일한 두 개의 STTD-OTD 시스템을 통한 반복적인 심벌 전송으로 인한 수신 신호의 시간 슬롯 증가를 제외하고는 기존의 STTD-OTD 시스템과 동일하다. 따라서 2.3.1절에 기술된 STTD-OTD의 동작 원리를 참고하면, 시공간 부호화된 4개의 심벌들은 4개의 송신 안테나를 이용하는 두 개의 동일한 시스템을 통하여 기존의 STTD-OTD 시스템의 4슬롯 전송 시간과는 달리 8 슬롯 시간 동안 송신 심벌이 전송된다. 이로부터 수신단 단일 안테나에서 얻어지는 수신 신호는 다음과 같다.

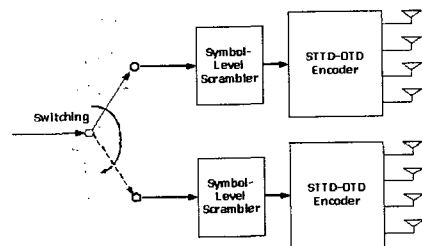


그림 6. STTD-OTD+TSTD를 위한 송신기 구조
Fig 6. Configuration of transmitter for STTD-OTD+TSTD

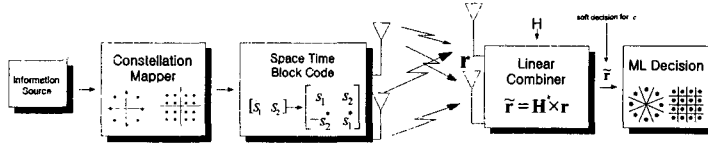


그림 7. STTD 송신 및 수신 다이버시티의 구조
Fig 7. Configuration of diversity for STTD Tx and Rx

$$\begin{aligned}
 r_1 &= s_1h_1 - s_2^*h_2 + s_3h_3 - s_4^*h_4 + n_1 \\
 r_2 &= s_1h_1 - s_2^*h_2 - s_3h_3 + s_4^*h_4 + n_2 \\
 r_3 &= s_2h_1 + s_1^*h_2 + s_4h_3 + s_3^*h_4 + n_3 \\
 r_4 &= s_2h_1 + s_1^*h_2 - s_4h_3 - s_3^*h_4 + n_4 \\
 r_5 &= s_1h_5 - s_2^*h_6 + s_3h_7 - s_4^*h_8 + n_5 \\
 r_6 &= s_1h_5 - s_2^*h_6 - s_3h_7 + s_4^*h_8 + n_6 \\
 r_7 &= s_2h_5 + s_1^*h_6 + s_4h_7 + s_3^*h_8 + n_7 \\
 r_8 &= s_2h_5 + s_1^*h_6 - s_4h_7 - s_3^*h_8 + n_8
 \end{aligned} \quad \dots\dots (18),$$

여기서 $r_i (i=1, \dots, 8)$ 는 8 슬롯동안 수신된 신호, $h_j (j=1, \dots, 8)$ 는 각각의 송신 안테나와 수신단 단일 안테나간의 채널을 의미한다. 그리고 $n_l (l=1, \dots, 8)$ 은 가우시안 잡음을 나타낸다. 수신 신호로부터 복호화 과정을 수행한 후, 송신된 심벌들을 다음과 같이 추정하게 된다.

$$\begin{aligned}
 \hat{s}_1 &= r_1h_1^* + r_2^*h_1 + r_3h_2 + r_4^*h_2 + r_5h_3 + r_6^*h_3 + r_7h_4 + r_8^*h_4 \\
 \hat{s}_2 &= -r_1^*h_2 - r_2h_2 + r_3h_1^* + r_4^*h_1 - r_5h_6 - r_6^*h_6 + r_7h_5 + r_8^*h_5 \\
 \hat{s}_3 &= r_1h_3 - r_2h_3^* + r_3h_4 - r_4^*h_4 + r_5h_7 - r_6^*h_7 + r_7h_8 - r_8^*h_8 \\
 \hat{s}_4 &= -r_1^*h_4 + r_2h_4 + r_3h_3^* - r_4h_3 - r_5h_8 + r_6^*h_8 + r_7h_7 - r_8^*h_7
 \end{aligned} \quad \dots\dots (19).$$

이렇게 추정된 심벌 $\hat{s}_j (j=1, \dots, 4)$ 를 가지고, 식 (6)과 동일한 방법을 적용하여 최종 심벌을 검출한다.

III. 개루프 송신 및 수신 다이버시티의 제안

3.1 STTD 송신 및 수신 다이버시티 기법 (STTD 2x2)

단말기의 저전력, 소형화, 저가격화 등의 요구 조건이 만족 되었을 때 수신부의 안테나 수의 증가는 더욱 효과적인 성능 향상 방안이 된다. 이처럼 STTD 송신 및 수신 다

이버시티 기법은 STTD 기법의 수신 안테나 수를 2개로 확장함으로써 다이버시티 효과를 기대하는 기법이다. (그림 7)과 같이 STBC 코드를 이용하여 두 심벌 구간동안 2개의 송신 안테나를 통해서 심벌 들이 2개의 수신 안테나로 전송하게 된다.

이로부터 얻어지는 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= s_1h_1 + s_2h_2 + n_1 \\
 r_{21} &= -s_2^*h_1 + s_1^*h_2 + n_2 \\
 r_{12} &= s_1h_3 + s_2h_4 + n_3 \\
 r_{22} &= -s_2^*h_3 + s_1^*h_4 + n_4
 \end{aligned}$$

..... (20).

여기서 $h_j (j=1, \dots, 4)$ 는 첫 번째와 두 번째 송신 안테나에서 첫 번째와 두 번째 수신단의 안테나로 전송될 때의 채널 성분을, $r_{ij} (i, j=1, \dots, 2)$ 에서 i 는 2 슬롯동안의 수신된 신호를, j 는 수신 안테나를 의미한다. 예를 들어, r_{11} 은 첫 번째 슬롯 구간 동안에 수신 안테나 1에서 수신된 신호를 나타낸다. 그리고 $n_l (l=1, \dots, 4)$ 은 가우시안 잡음을 나타낸다. 수신 신호로부터 복호화 과정을 수행한 후, 송신된 심벌들을 다음과 같이 추정하게 된다.

$$\begin{aligned}
 \hat{s}_1 &= r_1h_1^* + r_2^*h_2 + r_3h_3^* + r_4^*h_4 \\
 \hat{s}_2 &= r_1h_2^* - r_2^*h_1 + r_3h_4^* - r_4^*h_3
 \end{aligned} \quad \dots\dots (21).$$

여기서 $\hat{s}_j (j=1, \dots, 2)$ 는 송신 심벌 s_j 의 추정치를 의미한다. 이렇게 추정된 심벌 \hat{s}_j 를 가지고, 식 (6)과 동일한 방법을 적용하여 최종 심벌을 검출한다.

3.2 4Tx-STTD 송신 및 수신 다이버시티 기법 (4Tx-STTD 4x2)

(그림 8)과 같이 4Tx-STTD 기법의 수신 안테나 수를 2개로 확장한 기법이다. 송·수신 과정의 모든 방법들은 2.2.1에서 논의된 것과 동일하며 좀 더 나은 다이버시티 이득의 효과를 얻기 위하여 수신 안테나수를 확장한 것이다.

물론 이는 단말기에서의 저전력화, 소형화, 저가격화 등의 요구 조건이 만족되었다는 가정에 기반을 두고 있다. 안테나를 통해서 두 심벌 구간동안 2개의 수신안테나로 전송된 후 수신측에서 얻어지는 수신 신호는 다음과 같다.

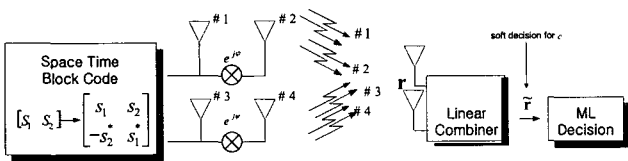


그림 8. 4Tx-STTD 송신 및 수신 다이버시티의 구조
Fig 8. Configuration of diversity for 4Tx-STTD

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= s_1 h_1 + s_1 e^{j\psi} h_2 + s_2 h_3 + s_2 e^{j\psi} h_4 + n_1 \\
 r_{21} &= -s_2^* h_1 - s_2^* e^{j\psi} h_2 + s_1^* h_3 + s_1^* e^{j\psi} h_4 + n_2 \\
 r_{12} &= s_1 h_5 + s_1 e^{j\psi} h_6 + s_2 h_7 + s_2 e^{j\psi} h_8 + n_3 \\
 r_{22} &= -s_2^* h_5 - s_2^* e^{j\psi} h_6 + s_1^* h_7 + s_1^* e^{j\psi} h_8 + n_4
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

여기서 $h_j (j=1, \dots, 8)$ 는 첫 번째와 두 번째 송신 안테나에서 첫 번째와 두 번째 수신단의 안테나로 전송될 때의 채널 성분을, $r_{ij} (i, j=1, \dots, 2)$ 에서 i 는 2 슬롯동안의 수신된 신호를, j 는 수신 안테나를 의미한다. 예를 들어, r_{11} 은 첫 번째 슬롯 구간 동안에 수신 안테나 1에서 수신된 신호를 나타낸다. 그리고 $n_l (l=1, \dots, 4)$ 은 가우시안 잡음을 나타낸다. 수신 신호로부터 복호화 과정을 수행한 후, 송신된 심벌들을 다음과 같이 추정하게 된다.

$$\begin{aligned}
 \hat{s}_1 &= r_{11} h_1^* + r_{11} (e^{j\psi} h_2)^* + r_{21}^* h_3 + r_{21}^* (e^{j\psi} h_4) \\
 &\quad + r_{12} h_5^* + r_{12} (e^{j\psi} h_6)^* + r_{22}^* h_7 + r_{22}^* (e^{j\psi} h_8) \\
 \hat{s}_2 &= r_{11} h_3^* + r_{11} (e^{j\psi} h_4)^* - r_{21}^* h_1 - r_{21}^* (e^{j\psi} h_2) \\
 &\quad + r_{12} h_7^* + r_{12} (e^{j\psi} h_8)^* - r_{22}^* h_5 - r_{22}^* (e^{j\psi} h_6)
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

여기서 $\hat{s}_j (j=1, \dots, 2)$ 는 송신 심벌 s_j 의 추정치를 의미한다. 이렇게 추정된 심벌 \hat{s}_j 를 가지고, 식 (6)과 동일한 방법을 적용하여 최종 심벌을 검출한다.

3.3 STTD-OTD 송신 및 수신 다이버시티 기법 (STTD-OTD 4x2)

2장에서 논의된 STTD-OTD 기법의 수신 안테나 수를 2개로 확장한 기법이다. 송 수신 과정의 모든 방법들은 2장에서 논의된 것과 동일하며 좀 더 나은 다이버시티 이득의 효과를 얻기 위하여 수신 안테나수를 확장한 것이다. 안테나를 통해서 두 심벌 구간동안 2개의 수신안테나로 전송된 후 수신측에서 얻어지는 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \hat{s}_1 &= r_{11} h_1^* + r_{11} (e^{j\psi} h_2)^* + r_{21}^* h_3 + r_{21}^* (e^{j\psi} h_4) \\
 &\quad + r_{12} h_5^* + r_{12} (e^{j\psi} h_6)^* + r_{22}^* h_7 + r_{22}^* (e^{j\psi} h_8) \\
 \hat{s}_2 &= r_{11} h_3^* + r_{11} (e^{j\psi} h_4)^* - r_{21}^* h_1 - r_{21}^* (e^{j\psi} h_2) \\
 &\quad + r_{12} h_7^* + r_{12} (e^{j\psi} h_8)^* - r_{22}^* h_5 - r_{22}^* (e^{j\psi} h_6)
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

여기서, $h_j (j=1, \dots, 8)$ 는 첫 번째와 두 번째 송신 안테나에서 첫 번째와 두 번째 수신단의 안테나로 전송될 때의 채널 성분을, $r_{ij} (i=1, \dots, 4, j=1, \dots, 2)$ 에서 i 는 4 슬롯동안의 수신된 신호를, j 는 수신 안테나를 의미한다. 예를 들어, r_{11} 은 첫 번째 슬롯 구간 동안에 수신 안테나 1에서 수신된 신호를 나타낸다. 그리고 $n_l (l=1, \dots, 8)$ 은 가우시안 잡음을 나타낸다. 수신 신호로부터 복호화 과정을 수행한 후, 송신된 심벌들을 다음과 같이 추정하게 된다.

$$\begin{aligned}
 \hat{s}_1 &= r_{11} h_1^* + r_{21}^* h_1 + r_{31} h_2 + r_{41} h_2 + r_{12} h_5^* + r_{22} h_5^* + r_{32} h_6 + r_{42} h_6 \\
 \hat{s}_2 &= -r_{11} h_2 - r_{21} h_2 + r_{31} h_1 + r_{41} h_1 - r_{12} h_6 - r_{22} h_6 + r_{32} h_5^* + r_{42} h_5^* \\
 \hat{s}_3 &= r_{11} h_3 - r_{21} h_3 + r_{31} h_4 - r_{41} h_4 + r_{12} h_3 - r_{22} h_7 + r_{32} h_8 - r_{42} h_8 \\
 \hat{s}_4 &= -r_{11} h_4 + r_{21} h_4 + r_{31} h_3 - r_{41} h_3 - r_{12} h_4 + r_{22} h_8 + r_{32} h_7 - r_{42} h_7
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

여기서 $\hat{s}_j (j=1, \dots, 2)$ 는 송신 심벌 s_j 의 추정치를 의미한다. 이렇게 추정된 심벌 \hat{s}_j 를 가지고, 식 (6)과 동일한 방법을 적용하여 최종 심벌을 검출한다.

IV. 수치 분석

2장과 3장에서 논의한 성능분석을 매트랩 프로그램을 이용하여 수치계산을 수행하였다.

(그림 9)는 STTD 송신 및 수신 다이버시티에서 송수신 안테나 수의 변화에 따른 BER 성능 곡선을 나타낸다. 기본적인 STTD 송신 기법에서 수신 안테나의 수를 확장시켜 송수신 안테나를 2개씩 사용하는 STTD 송신 및 수신 다이버시티 기법을 적용하였을 경우 성능이 가장 양호하다는 것을 알 수 있다. 송신 및 수신 다이버시티 기법은 단말기에서 전력, 크기, 무게, 가격 등의 제약만 해결된다면 가장 효과적인 방법이지만 현실적으로는 많은 제약과 어려움이 있다. 이에 반해서 기지국은 제약이 상대적으로 적으므로 기지국의 안테나 수를 증가시키는 방법을 택할 수 있다. (그림 9)를 보면 동일한 개수의 수신 안테나를 사용할 때 3개의 송신안테나를 사용한 경우가 가장 좋은 성능을 나타내고, 2개 혹은 4개의 송신 안테나를 사용할 경우 비슷한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 안테나 4개를 사용했을 경우 다이버시티 효과가 기대에 못 미치는 이유로는 4개의 안테나를 사용한 경우 부호화 과정에서 심벌간의 간섭이 생긴 결과로 인해 풀 다이버시티 불가능하였기 때문이다. 또한 송신 안테나의 증가는 수신 안테나의 증가와는 달리 송신측에서는 다른 셀로의 간섭을 일정하게 하기 위해 전체 송신 전력이 일정해야 한다. 따라서 N 개의 안테나를 사용하는 경우 각 안테나의 전력이 $\frac{1}{N}$ 로 감소되기 때문에 성능 감쇄의 영향을 준다.

(그림 10)은 4-Tx STTD 송신 및 수신 다이버시티에서의 BER 성능 곡선을 나타낸다. 1 개의 수신 안테나를 2개의 수신 안테나로 확장하였을 때 10^{-3} 의 BER에서 약 7dB 성능 차이가 나는 것을 알 수 있다. 수신 안테나의 증가는 효과적인 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있으며, 위상호핑 패턴을 추가한 4 Tx-STTD는 기본 STTD와 비교하였을 경우 성능이 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

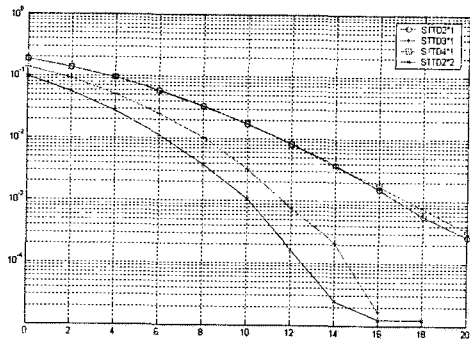


그림 9. STTD 송신 및 수신 다이버시티에서 BER 성능 곡선
Fig.9 BER performance for STTD Tx and Rx diversity

(그림 11)은 STTD-OTD 송신 및 수신 다이버시티에서 BER 성능 곡선과 STTD-OTD에 TSTD를 적용한 BER 성능 곡선이다. 수신 안테나의 증가는 효과적인 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. STTD-OTD에 TSTD 기법을 적용한 경우 STTD-OTD기법보다 10^{-3} 의 BER에서 약 4dB 성능 효과가 더 좋음을 알 수 있다. 이는 두 개의 동일한 STTD-OTD 시스템을 주기적인 스위칭 패턴을 이용하여 각각의 시스템을 번갈아가면서 송신 심벌들을 전송하는 복합 시스템이므로 송신단에서의 송신 심벌 전송시 한 슬롯 시간 구간에서 동시에 4개의 안테나를 사용하게 된다.

그 결과 송신 안테나별 송신 전력은 기존의 단일 STTD-OTD 시스템과 동일할 뿐만 아니라, 주기적인 스위칭 패턴에 따른 동일한 두 개의 시스템을 이용한다는 점에서 송신 안테나 정규화에 따른 송신 전력 감소 문제를 보완해줄 수 있었기 때문이다.

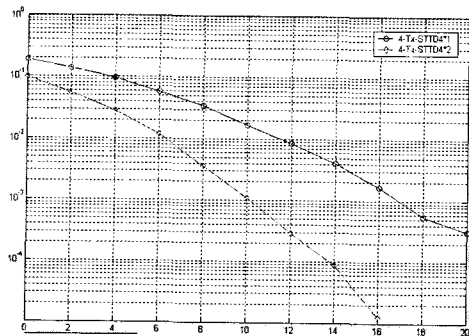


그림 10. 4Tx-STTD 송신 및 수신 다이버시티에서 BER 성능 곡선
Fig.10 BER performance for 4Tx-STTD Tx and Rx diversity

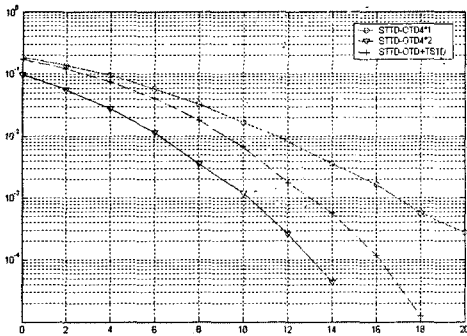


그림 11. STTD-OTD 송신 및 수신 다이버시티에서 BER 성능 곡선
 Fig.11 BER performance for STTD-OTD Tx and Rx diversity

V. 결론

본 논문에서는 3세대 이동통신 표준화 기구인 3GPP에서 다루어지는 개루프 송신 다이버시티 기법 중 STTD(Space Time Transmit Diversity) 기법 및 STTD를 기본으로 확장되어진 STTD-OTD, CL-STTD 그리고 4TX-STTD 들에 대한 성능을 분석하였다. 그리고 각 기법에서 수신 다이버시티를 추가한 개루프 송신 및 수신 다이버시티 기법을 제안하였다. 플랫 페이딩 채널 환경하에서 이들 기법들을 적용하여 모의 수치계산을 수행하고 성능을 비교 분석하였다.

STTD 기법, 4-Tx STTD 기법 그리고 STTD-OTD 기법의 성능 분석을 통해서 수신 안테나 개수의 확장시킨 송신 및 수신 다이버시티 기법에서 효과적인 다이버시티 이득을 얻었다. 기본적인 STTD 송신 기법에서 수신 안테나의 수를 확장시켜 송수신 안테나를 2개씩 사용하는 STTD 송신 및 수신 다이버시티 기법을 적용하였을 경우 성능이 가장 양호하다는 것을 알 수 있었지만 단말기에서의 수신 안테나의 증가는 저전력, 소형화, 저가격화 등의 제약이 있다. 한편 송신 다이버시티 기법을 적용할 경우에는 송신 안테나를 3개 사용하였을

경우 성능이 제일 양호하였으나, 송신측에서는 다른 셀로의 간섭을 일정하게 하기 위해 각 안테나의 송신전력을 1/3로 감소시켜야 하기 때문에 성능이 악화됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] R. Wichman and A. Hottinen, "TMT-2000 transmit diversity concepts", Proc. PIMRC '99, Osaka, Japan, Sep. 1999.
- [2] K. Rohani, M. Harrison, and K. Kuchi, "A comparison of base station transmit diversity methods for third generation cellular standards", Proc. Vehicular Tech. Conf. (VTC '99 - Spring), vol. 1, pp. 351-355, Houston, USA, May 1999.
- [3] 3rd Generation Partnership; Technical Specification Group Radio Access Network; Tx diversity solutions for multiple antennas (Release 6), 3G TR25.869, v.1.0.2, 2003.
- [4] L. M. A. Jalloul, K. Rohani, K. Kuchi, and J. Chen, "Performance analysis of CDMA transmit diversity methods", Proc. Vehicular Tech. Conf. (VTC '99 - Fall), vol. 3, pp. 1326-1330, Amsterdam, The Netherlands, Sep. 1999.
- [5] J. S. Thompson, P. M. Grant, and B. Mulgrew, "Downlink transmit diversity schemes for CDMA networks", Proc. Vehicular Tech. Conf. (VTC '99 - Fall), vol. 3, pp. 1382-1386, Amsterdam, The Netherlands, Sep. 1999.
- [6] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications", IEEE J. Select. Areas Commu., vol. 16, no.8, pp.1451-1458, Oct. 1998.
- [7] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Calderbank, "Space time block codes from orthogonal designs", IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 45, no.5, pp.1456-1467, July. 1999.
- [8] G. G. Raleigh and J. M. Cioffi "Spatio-temporal coding for wireless communications" IEEE Trans. Commu., vol. 46, no.3, pp.357-366, March 1998.
- [9] O. Trikkonen and A. Hottinen, "Complex space-time

block codes for four tx antennas”, Proc. IEEE Globecom, San Francisco, CA.. November, 2000.

- [10] 황근철, 이광복, “다중 전송 안테나와 다중 수신 안테나를 이용한 초고속 이동통신 시스템,” 한국통신학회지, 제 18권, pp. 111-114, 2001년 6월.
- [11] 황근철, 박창순, 이광복, “Diversity와 MIMO 기술,” 텔레콤, 제 18권, 제2호, pp. 3-15, 2002년 12월.

저 자 소개



박 상 조

1983년 2월 서울대학교 제어계측공학과(학사)
 1985년 2월 서울대학교 대학원 제어계측공학과(공학석사)
 1999년 3월 일본 오사카대학 통신공학(공학박사)
 1984년~1991 삼성전자 종합연구소 선임연구원
 1995년~1996년 오사카대학 연구생
 1992년~2000년 한국전자통신연구원 선임연구원
 2003년~2006년 한국전자통신연구원 초빙연구원
 2000년~현재 서원대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수
 <관심분야> 광무선 액세스 네트워크, 광 CDMA 방식, 센서네트워크



노 옴 우

2005년 2월 서원대학교 컴퓨터정보통신공학부(학사)
 2005년~현재 UTStarcom korea 근무

