STBC를 이용한 WCDMA 순방향 링크 시스템의 성능개선

준회원 박 정 숙*, 정회원 박 중 후**

Performance Improvement of WCDMA Downlink Systems Using Space Time Block Coding

Jeong-Sook Park* *Associate Member,* Joong-Hoo Park* *Regular Member*

요 약

무선 이동 통신 시스템에서 멀티 미디어 서비스를 제공하기 위해서는 전송되는 데이터의 대용량화와 데이터 전송 속도의 고속화가 요구된다. 이를 위해 다중안테나를 이용한 이동 통신 시스템 기술이 제안되고 있다. 본 논문에서는 준정지 (Quasi-Static) 레일레이 (Rayleigh) 페이딩 채널 환경에서 시공간 블럭 코딩 (Space-Time Block Coding)을 이용한 WCDMA 시스템의 성능 개선 방안을 제안하고자 한다. 제안된 수신기에서는 다중 경로에 대응하는 각각의 핑거에서 얻어지는 상호상관행렬 (Cross Correlation Matrix)을 이용하는데, 수신된 신호에 상호상관 행렬의 역행렬을 먼저 곱해주고, 각 경로의 채널 행렬의 Hermitian 행렬을 곱해줌으로써 최대 다이버시티 이득을 얻고자 한다. 레일레이 페이딩 채널환경에서의 다양한 모의실험을 통해서 제안된 수신기가 기존의 수신기에 비해 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

Key words : STBC, WCDMA

ABSTRACT

High-data rate and high speed communication techniques are required for wireless mobile communication systems to provide multimedia services. A multiple antenna technology may be used to meet this demand. In this paper, a method for performance improvement of a WCDMA downlink system using space time block coding is proposed in quasi-static Rayleigh fading channels. The proposed receiver uses the cross correlation matrix obtained by each finger corresponding to multi paths. To obtain maximum diversity gain, the inverse of cross correlation matrix and the Hermitian matrix of the channel matrix for each path are computed, and then applied to received signals. Various simulation results show that the proposed receiver outperforms a conventional receiver in Rayleigh fading channels.

Ⅰ. 서 론

무선 이동 통신 시스템에서 데이터의 대용량화 및 데이터 전송의 고속화에 대응하기 위해 다중안테나를 이용한 전송 기술이 활발히 연구되고 있다. 시공간 부호 (Space Time Coding) 기술은 여러 개의 송수신 안테나를 이용하여 공간 다이버시티와 부호화 방식을 결합함으로써 무선 이동 통신 환경에서 뛰어난 성능을 구현하는 방법이다.

Tarokh은 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 채널에 대해 부호화 이득과 최대 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 새로운 형태의 부호인 시

* 한양대학교 대학원 전자전기제어계측과 이동통신시스템 연구실 (jhpark1@hanyang.ac.kr)
논문번호 : 030466-1023 , 접수일자 : 2003년 10월 23일

공간 트렐리스 부호 (Space Time Trellis Code)를 제안하였다[1]. 그러나, 시공간 트렐리스 부호는 안테나수와 전송률에 따라 복잡도가 지수적으로 증가한다는 단점이 있다. 그래서 Alamouti는 최대 전송률과 최대 다이버시티 이득을 제공하면서 단순한 최대 우도 복호 (Maximum Likelihood Decoding)가 가능하고, 간단한 전송 다이버시티를 구현할 수 있는 시공간 블럭 부호 (Space Time Block Code)를 제안하였다[2]. 또한 Tarokh는 전송안테나의 수에 따라 실수 형태와 복소수 형태의 여러 가지 전송률을 가진 직교 시공간 블럭 부호들을 제안하였다[3].

본 논문에서는 순방향 링크 (Downlink)에서 전송 다이버시티를 얻을 수 있는 직교 시공간 블럭 부호를 이용하는 WCDMA 시스템을 위한 수신기를 설계하고, 그 성능을 평가하고자 한다. 시스템 구조를 간단하게 하기 위하여 두 개의 송신 안테나와 하나의 수신안테나를 가지는 경우에 대해서 살펴보기로 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어서, 2장에서는 STBC를 사용하는 WCDMA 순방향 링크 시스템 모델을 설명하고, 3장에서는 2장에서 설명한 시스템에 대한 모의 실험 결과를 보이고, 4장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. STBC를 사용하는 WCDMA 순방향 링크 시스템 모델

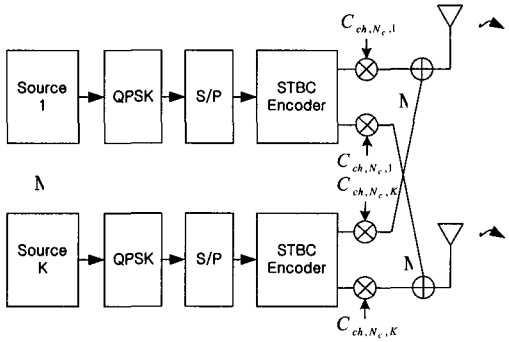
1. 기존의 수신기 구조

QPSK 변조방식을 사용하는 WCDMA 순방향 링크 시스템을 고려하자. 두 개의 송신 안테나와 한 개의 수신안테나를 가진 WCDMA 시스템은 그림 1

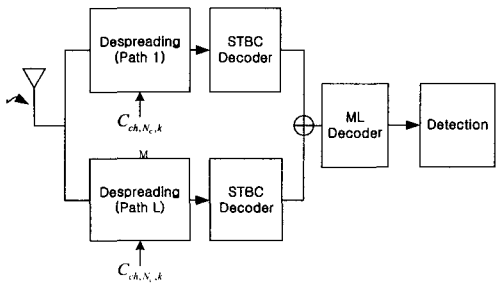
표 1 STBC 부호 구조

	t	$t+T$
안테나 1	$x_{j,1}$	$-x_{j,2}^{*}$
안테나 2	$x_{j,2}$	$x_{j,1}^{*}$

과 같은 구조를 갖는다. 변조된 QPSK 신호는 STBC 부호화 블럭에서 표 1과 같이 부호화 되고, 길이가 N_c인 OVSF 코드로 확산되어 각 송신 안테나로 전송된다. 여기서 $x_{j,1}$, $x_{j,2}$는 j번째 사용자의 연속된 심볼들을 나타낸다. 첫 번째 심볼 주기 동안 두 개의 송신안테나를 이용하여 각각 $x_{j,1}$, $x_{j,2}$ 를 전송하고 두번째 심볼 주기 동안에는 각각 $-x_{j,2}^{*}$, $x_{j,1}^{*}$를 전송한다. 여기서 *는 각 심볼의 complex conjugate를 나타낸다.



(a) 송신단



(b) 수신단

그림 1. STBC를 이용한 WCDMA 순방향 링크의 송수신기 구조

각 송수신 안테나 사이의 채널은 모든 경로에 대하여 독립적인 레일레이 페이딩 채널이고, 채널의 페이딩이 연속된 두 심볼 주기동안 변하지 않는 준정지 채널이라고 가정한다. 변수 $h_{j,l}^{i}$를 j번째 사용자의 i번째 송신 안테나와 수신안테나 사이의 l번째 경로의 채널값이라고 하면, 사용자수가 K이고, L개의 경로가 있을 경우, 채널을 통과한 후 l번째 경로를 통해 수신 안테나에 수신된 연속된 두 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$r_1(t)=\sum_{p=1}^{L}\sum_{j=1}^{K}\left[h_{j,p}^{1}x_{j,1}C_{ch,N_c,j}(t-\tau_{j,p})+h_{j,p}^{2}x_{j,2}C_{ch,N_c,j}(t-\tau_{j,p})\right]+n_1(t) \quad (1)$$

$$r_2(t)=\sum_{p=1}^{L}\sum_{j=1}^{K}\left[-h_{j,p}^{1}x_{j,2}^{*}C_{ch,N_c,j}(t-\tau_{j,p})+h_{j,p}^{2}x_{j,1}^{*}C_{ch,N_c,j}(t-\tau_{j,p})\right]+n_2(t) \quad (2)$$

여기서 $n_1(t)$와 $n_2(t)$는 백색가우시안 잡음이다. 또한 $C_{ch,N_c,j}$는 [4]에 제시된 칩수가 $N_c=64$인 OVSF 코드이고, $j\ (=0,1,...,N_c-1)$는 코드 번호를 나타낸다. 일반적으로, 사용자마다 다른 코드를 사용한다. 그리고, $\tau_{j,l}$는 j번째 사용자의 l번째 경로에서의 시간지연을 나타낸다. 참고로, (1)식과 (2)식에서 사용된 OVSF 코드는 직교성을 가지고 있다.

첫 번째 심볼 주기동안 도착한 신호를 OVSF 코드를 이용하여 역확산시키면 다음과 같다.

$$r_{k,l,1}=h_{k,l}^{1}x_{k,1}+h_{k,l}^{2}x_{k,2}+n_{k,l,1} \quad (3)$$

같은 방법으로 두 번째 심볼 주기동안 도착한 신호를 OVSF 코드를 이용하여 역확산시키면 다음과 같다.

$$r_{k,l,2}=-h_{k,l}^{1}x_{k,2}^{*}+h_{k,l}^{2}x_{k,1}^{*}+n_{k,l,2} \quad (4)$$

그러므로 k번째 사용자의 l번째 경로를 통해 수신된 신호를 행렬-벡터 형태로 표현하면, 아래 식과 같다.

$$\mathbf{r}_l=\mathbf{H}_l\mathbf{x}_k+\mathbf{n}_l \quad (5)$$

여기서 각 벡터의 성분은, $\mathbf{r}_l=[r_{k,l,1}\ \ r_{k,l,2}^{*}]^T$, $\mathbf{x}_k=[x_{k,1}\ \ x_{k,2}]^T$, $\mathbf{n}_l=[n_{k,l,1}\ \ n_{k,l,2}^{*}]^T$ 이고, 채널 행렬 $\mathbf{H}_l$은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H}_l=\begin{bmatrix}h_{k,l}^{1} & h_{k,l}^{2}\\ h_{k,l}^{2*} & -h_{k,l}^{1*}\end{bmatrix} \quad (6)$$

(5)식에 채널 행렬 $\mathbf{H}_l$의 Hermitian 행렬 $\mathbf{H}_l^H$을 곱해주면 (7)식과 같이 된다.

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{k,l}&=\mathbf{H}_l^H\mathbf{r}_l=\mathbf{H}_l^H\mathbf{H}_l\mathbf{x}_k+\mathbf{H}_l^H\mathbf{n}_l\\&=\begin{bmatrix}h_{k,l}^{1*} & h_{k,l}^{2}\\ h_{k,l}^{2*} & -h_{k,l}^{1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}h_{k,l}^{1} & h_{k,l}^{2}\\ h_{k,l}^{2*} & -h_{k,l}^{1*}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{k,1}\\ x_{k,2}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}h_{k,l}^{1*} & h_{k,l}^{2}\\ h_{k,l}^{2*} & -h_{k,l}^{1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}n_{k,l,1}\\ n_{k,l,2}\end{bmatrix}\\&=\begin{bmatrix}|h_{k,l}^{1}|^2+|h_{k,l}^{2}|^2 & 0\\ 0 & |h_{k,l}^{1}|^2+|h_{k,l}^{2}|^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{k,1}\\ x_{k,2}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}h_{k,l}^{1*}n_{k,l,1}+h_{k,l}^{2}n_{k,l,2}\\ h_{k,l}^{2*}n_{k,l,1}-h_{k,l}^{1}n_{k,l,2}\end{bmatrix}\\&=\begin{bmatrix}|h_{k,l}^{1}|^2+|h_{k,l}^{2}|^2 & 0\\ 0 & |h_{k,l}^{1}|^2+|h_{k,l}^{2}|^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{k,1}\\ x_{k,2}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}v_{k,l,1}\\ v_{k,l,2}\end{bmatrix}\end{aligned} \quad (7)$$

각 경로를 통해서 얻어진 신호는 (8)식과 같이 결합되어 전송된 신호를 복원하는데 사용된다.

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_k&=\sum_{l=1}^{L}\mathbf{H}_l^H\mathbf{r}_l\\&=\sum_{l=1}^{L}\begin{bmatrix}|h_{k,l}^{1}|^2+|h_{k,l}^{2}|^2 & 0\\ 0 & |h_{k,l}^{1}|^2+|h_{k,l}^{2}|^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{k,1}\\ x_{k,2}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}v_1\\ v_2\end{bmatrix}\end{aligned} \quad (8)$$

(8)식으로 표현된 신호를 최대 우도 복호기에 통과시키면 전송된 신호를 복원할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{x}}=\arg\min_{\mathbf{x}}\left|\hat{\mathbf{x}}_k-\sum_{l=1}^{L}\mathbf{H}_l^H\mathbf{H}_l\mathbf{x}\right|^2 \quad (9)$$

2. 새로운 수신기 구조

Ⅱ-1절의 (3)식과 (4)식에서 각 경로마다 발생하는 시간지연 $\tau_{j,l}$이 칩 단위의 정수배로 표현된다면 OVSF 코드를 이용하여 다른 사용자의 간섭을 제거할 수 있고, 다중경로 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 그러나 시간지연 $\tau_{j,l}$이 한 칩 이내에서 발생하는 경우에는 ($0<\tau_{j,l}<T_c$), 다른 사용자와 다른 경로에 의한 간섭이 발생하게 된다. 새로 제안된 시스템은 먼저 다중 경로와 l번째 경로의 상호상관행

렬의 역행렬을 구해서 곱해주고, 채널 행렬의 Hermitian 행렬을 곱해줌으로써 최대의 다이버시티를 얻을 수 있는 구조로 되어있다. 새로 제안된 수신기의 구조는 그림 2와 같다. 채널을 통과한 후 도착한 신호 $r(t)$를 정합필터를 통과시킨 후 얻어진 연속된 두 신호 $y_{j,l,1}$, $y_{j,l,2}$, $j=1,\ldots,K$를 행렬-벡터 형태로 나타내면 (10)식과 같다.

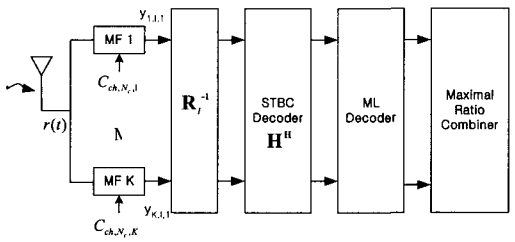


그림 2. 새로운 수신기 구조

$$\mathbf{y}_l = \mathbf{R}_l \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}_l \tag{10}$$

여기서 각 성분은 아래와 같다.

$$\mathbf{y}_l = \left[y_{1,l,1} \quad y_{1,l,2}^{*} \quad y_{2,l,1} \quad y_{2,l,2}^{*} \quad \Lambda \quad y_{K,l,1} \quad y_{K,l,2}^{*} \right]^T \tag{11}$$

변수 $y_{j,l,i}$는 j번째 사용자의 l번째 경로에 대응하는 신호를 나타내며, i는 연속된 두 심볼을 나타내는 지수이다. 또한 상호상관행렬 $\mathbf{R}_l$은 (12)식과 같이 표현된다.

$$\mathbf{R}_l = \begin{bmatrix} R_{1,1,1} & 0_L & R_{1,2,1} & 0_L & \Lambda & R_{1,K,1} & 0_L \\ 0_L & R_{1,1,2} & 0_L & R_{1,2,2} & & 0_L & R_{1,K,2} \\ & & & & \mathrm{O} & & \\ R_{K,1,1} & 0_L & R_{K,2,1} & 0_L & \Lambda & R_{1,K,1} & 0_L \\ 0_L & R_{K,1,2} & 0_L & R_{K,2,2} & \Lambda & 0_L & R_{K,K,2} \end{bmatrix} \tag{12}$$

상호상관행렬 $\mathbf{R}_l$의 각 성분은 다음 식과 같이 정의된다.

$$R_{j,k,i} = \left[R_{j,k,i}(1,l) \quad \Lambda \quad R_{j,k,i}(L,l) \right] \tag{13}$$

$$R_{j,k,i}(p,l) = \int_{T_b+\hat{\tau}_{j,1}}^{(i+1)T_b+\hat{\tau}_{j,1}} C_{ch,N_c,j}(t-\tau_{j,p}) C_{ch,N_c,k}(t-\hat{\tau}_{k,l}) dt \tag{14}$$

또한 0_L은 $(1\times L)$의 영행렬이다. 위의 (14)식에서 $R_{j,k,i}(p,l)$의 아래첨자 j와 k는 사용자를 나타내고, 변수 p와 l은 경로를 나타내며, i는 연속된 두 심볼을 나타낸다. 그리고 채널 행렬 $\mathbf{H}$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_1 & \bar{0} & \Lambda & \bar{0} \\ \bar{0} & H_2 & \Lambda & \bar{0} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & \mathrm{O} & \mathrm{M} \\ \bar{0} & \bar{0} & \Lambda & H_K \end{bmatrix} \tag{15}$$

여기서 H_j는 (16)식과 같이 표현된다.

$$H_j = \begin{bmatrix} h_{j,1}^1 & h_{j,1}^2 \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ h_{j,L}^1 & h_{j,L}^2 \\ h_{j,1}^{2*} & -h_{j,1}^{1*} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} \\ h_{j,L}^{2*} & -h_{j,L}^{1*} \end{bmatrix} \tag{16}$$

또한 $\bar{0}$는 $(2L\times 2)$의 영행렬이다. 마지막으로 전송된 각 사용자의 신호 $\mathbf{x}$는 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{x} = \left[x_{1,1} \quad x_{1,2} \quad x_{2,1} \quad x_{2,2} \quad \Lambda \quad x_{K,1} \quad x_{K,2} \right]^T \tag{17}$$

전송된 신호를 복원하기 위해서 (10)식에 먼저 $\mathbf{R}^{-1}$을 곱해주고, 채널 행렬의 Hermitian 행렬 $\mathbf{H}_l^H$을 곱해주면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}}_l = \mathbf{H}^H \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{R}_l \mathbf{H} \mathbf{x} + \hat{\mathbf{n}} \tag{18}$$

전송된 신호는 최대 우도 복호기를 사용하여 다음과 같이 복원할 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{x}}_l = \arg\min_{\mathbf{x}} \left| \hat{\mathbf{x}}_l - \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{x} \right|^2 \tag{19}$$

이렇게 하여 k번째 사용자의 연속된 두 신호를 얻을 수 있다.

$$x_{k,l,1} = \mathrm{sgn}\left[\tilde{\mathbf{x}}_{l,(2k+1)} \right] \tag{20}$$

$$x_{k,l,2} = \mathrm{sgn}\left[\tilde{\mathbf{x}}_{l,(2k+2)} \right] \tag{21}$$

각 경로를 통해 얻어진 신호를 결합하기 위하여 MRC (Maximal Ratio Combining) 방법을 사용한다.

Ⅲ. 모의 실험 결과

모의 실험을 위한 시스템 환경은 다음과 같이 설정하였다. 칩수가 $N_c = 64$인 OVSF 코드를 확산 코드로 사용하는 WCDMA 순방향 링크 시스템을 선택하였다. 반송파의 주파수는 $f_c = 2GHz$라고 가정하였다. 채널 환경은 수신기의 속도가 $3km/h$인 채널[5]을 선택하였고, 수신기에서 채널과 도착지연 시간에 대한 추정은 정확하다고 가정한다. 각 경로에 대한 전력 손실은 경로가 2개일 때는 각각 0dB과 -10dB로 하였고, 경로가 3개일 때는 각각 0dB, -4dB, -6dB로 하였다. 같은 셀 내의 사용자 수를 변화시키면서 성능을 비교하였다. 몬테카를로 (Monte Carlo) 시뮬레이션을 이용하여 비트 오차율 (BER; Bit Error Rate)을 구하였다. 실험의 신뢰도를 높이기 위해 같은 실험을 반복하여 얻은 BER의 평균값을 사용하였다. 모의 실험에 사용한 총 심볼의 수는 200만개이다.

그림 3은 QPSK 변조를 이용한 WCDMA 순방향 링크 시스템에서 STBC를 사용하지 않았을 때와 사용했을 때의 BER을 나타낸 것이다. 두 개의 송신 안테나에서 전송되는 신호의 총 전력은 한 개의 송신 안테나로 전송되는 신호의 전력과 같도록 설정하였다. 두 개의 송신안테나와 한 개의 수신안테나가 있는 시스템에서는 STBC를 사용하면 10^{-2}의 BER에서 5dB 정도의 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

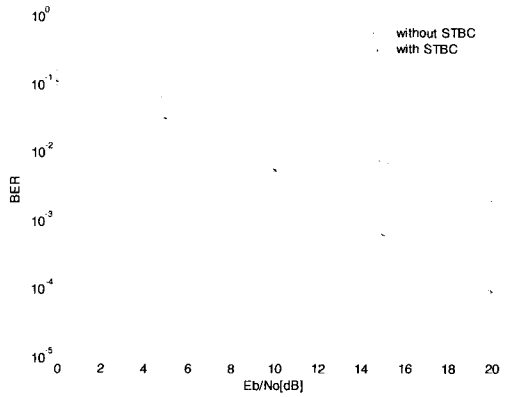


그림 3. 시공간 부호화를 이용한 WCDMA 순방향링크 시스템의 다이버시티 이득

그림 4는 시간지연 $\tau_{j,l}$를 칩 단위의 정수배로 하여 모의실험을 한 결과이다. 그림 4에서는 사용자가 1명일 때 다중 경로가 두 개, 세 개인 경우에서의 다중 경로 다이버시티 효과를 보여준다. BER이 10^{-3}인 경우에 경로가 두 개, 세 개일때 각각 2dB, 4dB정도의 다중 경로 다이버시티 이득을 얻음을 볼 수 있다.

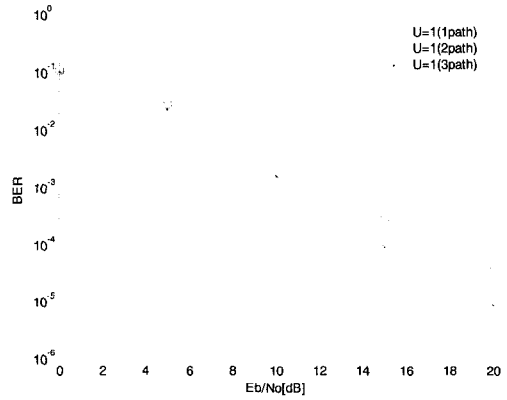


그림 4. 다중경로 다이버시티

그림 5와 그림 6에서는 시간지연 $\tau_{j,l}$이 한 칩 이내 ($0 < \tau_{j,l} < T_c$) 에서 발생되는 환경에서 모의실험을 한 결과이다. 그림 5에서 보는 것과 같이 두 개의 경로가 존재하는 페이딩 채널에서는 BER이 10^{-2}인 경우 STBC를 사용했을 때 성능이 5dB정도 향상됨을 볼 수 있다. 또한 기존의 수신기보다 제안된 새로운 수신기의 성능이 0.5dB정도 향상됨을 볼 수 있다. 그림 6에서와 같이 세 개의 경로가 존재하는 페이딩 채널에서는 성능 향상 효과를 더 확실히 관찰할 수 있다. BER이 10^{-2}인 경우에 새로운 수신기의 성능이 기존의 수신기보다 2dB 정도의 이득이 나타남을 관찰할 수 있고, 10^{-3}의 BER에서는 5dB 정도의 이득 향상을 관찰할 수 있다.

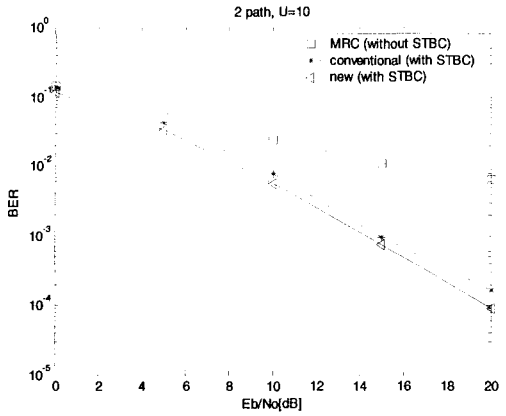


그림 5. 2개의 경로가 있을 때 기존의 수신기와 새로운 수신기의 성능 비교

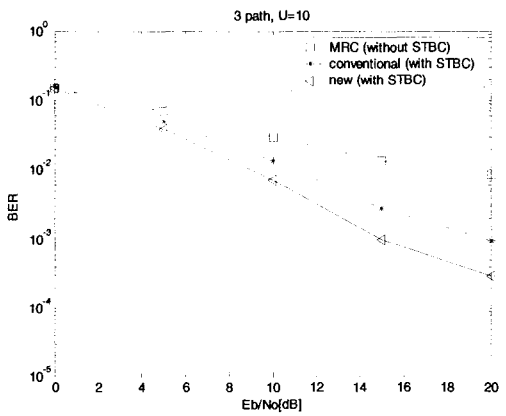


그림 6. 3개의 경로가 있을 때 기존의 수신기와 새로운 수신기의 성능 비교

Ⅳ. 결 론

WCDMA 순방향 링크 시스템에서는 송신부에 두 개의 안테나를 설치하여 직교성을 가지는 시공간 블럭 부호를 이용함으로써 페이딩 채널 환경에서 시공간 다이버시티를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 도착지연시간이 한 칩 이내인 경우에 기존의 수신기에서 발생하는 성능저하를 개선할 수 있는 새로운 수신기 구조를 제안하였다. 새로운 수신기에서는 다중 경로에 대응하는 각각의 핑거에서 얻어지는 상호상관행렬을 이용하여, 수신된 신호에 상호상관 행렬의 역행렬을 먼저 곱해주고, 각 경로의 채널 행렬의 Hermitian 행렬을 곱해줌으로써 성능을 향상시킬 수 있다. 모의실험 결과로부터 기존의 수신기보다 새로운 수신기의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 채널 값이나 도착지연시간을 정확히 추정하지 못하면 제대로 된 이득을 얻지 못할 수 있으므로 향후 채널 값과 도착지연시간의 추정오차에 의한 성능 열화에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] V.Tarock, N. Seshadri and A.R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication : performance criterion and code construction," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.44, p. 744-765, Mar 1998.

[2] S.M. Alammouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communcations," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp 1451-1458, Oct 1998.

[3] V.Tarock, N. Seshadri and A.R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Transactions Inform. Theory*, vol. 45, pp.1456-1467, Jul 1999.

[4] 3GPP Technical Spec. 25.213, Spreading and modulation (FDD), V3.5.0, Sept, 2001

[5] Li Yingbo and Y.L. Guan, "Modified Jakes' model for simulating multiple uncorrelated fading waveforms" Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. *VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE* 51st, vol. 3, pp. 1819-1822, 2000

박 정 숙 (Jeong-Sook Park) 준회원

2001년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사

2004년 2월: 한양대학교 대학원 전자전기제어계측공학과 석사

<관심분야> 이동통신 시스템, STTD 수신기

박 중 후 (Joong-Hoo Park) 종신회원

1985년 2월: 서울대학교 전자공학과 학사

1987년 2월: 서울대학교 대학원 전자공학과 석사

1987년 1월 ~ 1992년 6월: LG전자 중앙연구소 선임연구원

1992년 8월 ~ 1993년 3월: 나다텔 연구소 선임연구원

1997년 11월 ~ 2000년 2월: 삼성전자 통신연구소 수석연구원

2000년 3월 ~ 현재: 한양대학교 공학대학 전자컴퓨터공학부 조교수

<관심분야> 디지털통신 시스템, 이동통신 시스템, OFDM-CDMA 시스템, UWB 시스템