

논문 2004-41TC-3-2

계층화 시공간 구조와 시공간 트렐리스 부호를 결합한 시스템에 적합한 계층화 수신기

(Layered Receivers for System Combined Layered Space-Time
Processing and Space-Time Trellis Codes)

임 은 정*, 김 동 구*

(Eun Jeong Yim and Dong Ku Kim)

요 약

계층화 시공간 구조와 시공간 트렐리스 부호를 결합한 시스템은 대역폭 확장없이 디버시티 이득과 부호화 이득 뿐 아니라 높은 전송률을 공급할 수 있다. 본 논문에서는 이 시스템에 적합한 두 가지 계층화 수신기 구조를 제안한다. 제안된 계층화 수신기 중 하나(LSTT-MMSE)는 신호를 interference nulling 과정을 통해, 부호화된 그룹 단위로 분류한 다음 각각의 시공간 트렐리스 복호기를 통해 복호하는 구조를 가지고 있다. 다른 하나의 제안된 수신기(LSTT-Whitening)는 interference nulling을 whitening과정으로 대체한 구조를 가지고 있다. Whitening을 적용한 수신기는 부호화된 시공간 구조에 비해 디버시티 이득과 수신 안테나의 수를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 제안된 두 수신기는 간섭 억제(interference suppression) 방식에 따라 다른 복호순서(decoding order) 결정 방법을 사용한다. (4, 3) LSTT-Whitening 수신기는 (4, 4) LSTT-Nulling 수신기와 (4, 4) 부호화된 계층화 시공간 구조에 비해 수신 안테나의 수를 줄여도 여전히 1dB 성능 이득을 보인다.

Abstract

The system combined layered space-time processing and space-time trellis codes (STTC) provide high transmission rate as well as diversity and coding gain without bandwidth expansion. In this paper, two layered receiver structures are proposed. One is the LSTT-MMSE in which received bit streams are decoupled by interference nulling and then decoded by separate STTC decoders. The decoded outputs are cancelled from the received signal before advancing to the next layer detection. The other is LSTT-Whitening employing whitening rather than nulling. The receiver employing whitening process shows several advantages on diversity gain and the required number of receive antennas compare to the convolutional coded space-time processing. The proposed receivers use different decoding order scheme according to each interference suppression. The (4, 3) LSTT-Whitening receiver still achieves 1dB gain over the (4, 4) LSTT-MMSE and the (4, 4) coded layered space-time processing.

Keywords : MIMO, space-time trellis code, MMSE, whitening process, decoding order

I. 서 론

시공간 부호(space-time coding)는 안테나 어레이 방식(antenna array processing technology)을 적용하여 다중 입력 다중 출력(multiple input multiple output -

MIMO) 채널 환경에 적합하게 개발된 기술이다. 시공간 부호는 대표적으로 직교 시공간 블록 부호(orthogonal space-time block coding - OSTBC)와 시공간 트렐리스 부호(STTC) 그리고 계층화 시공간 구조인 BLAST가 있다^[1]. OSTBC^[2]와 STTC^[3]는 대역폭 확장 없이 최대 디버시티 이득을 얻을 수 있지만 전송률을 쉽게 증가시킬 수 없다는 단점을 가지고 있다. BLAST^[4]는 송신 안테나의 수에 비례하여 전송률을 증가시킬 수 있지만 계층별 복호 과정 때문에 최대 디버시티 이득을 기대 할 수가 없다는 단점을 가지고 있다.

* 정희원, 연세대학교 전기전자공학과
(Yonsei Univ., Dept. of Electrical and Electronic)
※ 본 연구는 전자통신연구소 (ETRI: 프로젝트 계약
번호 01-0347)의 지원하에 이루어짐.
접수일자: 2003년2월6일, 수정완료일: 2003년3월1일

본 논문에서는 계층화 시공간 구조와 시공간 트렐리스 부호를 결합한 시스템을 이용함으로써 대역폭의 확장 없이 디버시티 이득과 부호화 이득 뿐 아니라 높은 전송률을 공급하고자 하였다. 이 시스템은 여러 개의 시공간 트렐리스 부호를 이용하여 각각 다른 정보를 부호화하는 구조를 가지고 있기 때문에 이에 적합하도록 두 가지 형태의 계층화 수신기 구조를 제안하였다. 계층화 수신기 중 하나(LSTT-MMSE)는 신호를 interference nulling 과정을 통해 부호화된 그룹 단위로 분류한 다음 각각의 시공간 트렐리스 복호기를 통해 복호하는 구조를 가지고 있다. 다른 하나의 수신기(LSTT-Whitening)는 잡음을 제거하는 MMSE를 whitening과 정으로 대체한 구조를 가지고 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장은 일반적인 부호화된 계층화 구조(V-BLAST)를 설명하고, III장에서는 계층화 시공간 구조와 시공간 트렐리스 부호를 결합한 시스템의 송신기 구조와 제안된 수신기 구조 및 복호 순서 결정 방식을 설명한다. IV장에서는 모의 실험 결과를 제시하고 마지막으로 V장에서 결론을 내린다.

II. BLAST(Bell Laboratories Layered Space-Time) 구조

그림 1은 부호화된 (N, M) 계층화 시공간 MIMO 시스템을 나타낸다. 여기서, N 은 송신 안테나 개수를 M 은 수신 안테나 개수를 의미한다.

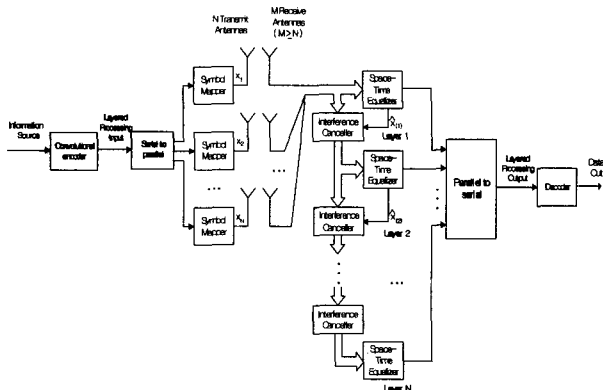


그림 1. 부호화된 V-BLAST 시스템
Fig. 1. The coded V-BLAST system

부호화된 (N, M) 계층화 시공간 MIMO 시스템은 다음과 같은 구조를 가지고 있다. 데이터 비트 스트림을 부호화 한 다음 여러 개의 부-스트림(sub-stream)으

로 나눈다. 그리고 나서 각 부-스트림을 변조하여 각 송신 안테나로 동시에 전송한다. 수신 단에서는 잡음 억제(interference suppression) 기술과 잡음 제거(interference cancellation) 기술을 적용하여 송신단에서 보낸 신호를 분류해 낸다. 이때, 잡음 억제(interference suppression) 기술로 MMSE나 Zero-Forcing 방식을 사용하며, 완벽한 nulling을 하기 위해서는 수신 안테나의 개수 M 이 송신 안테나의 개수 N 보다 크거나 같아야 한다는 조건을 만족해야 한다. 그림 1에 보여주고 있는 구조는 본 논문에서 제안한 수신기의 성능을 보여주기 위해 비교 대상으로 사용하였다.

III. 계층화 시공간 구조와 시공간 트렐리스 부호를 결합한 시스템

MIMO 시스템은 디버시티 이득을 얻을 수 있는 방향과 전송률을 증가시킬 수 있는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 디버시티 이득과 전송률을 모두 고려하기 위해서 계층화 시공간 구조와 시공간 트렐리스 부호를 결합한 시스템을 이용하였다. 이 시스템은 대역폭의 확장 없이 디버시티 이득과 부호화 이득 뿐 아니라 높은 전송률을 공급하는 것이 가능하다.

1. 송신단

그림 2는 계층화 시공간 구조와 시공간 트렐리스 부호를 결합 시스템으로써 N 개의 송신 안테나와 M 개의 수신 안테나를 가지고 있다. 송신단에서는 정보 스트림을 $N/2$ 개의 부-스트림 $b_g[m]$, ($g = 1, 2, \dots, N/2$)으로 나누고 난 다음, 각 부-스트림(sub-stream)을 각각의 시공간 트렐리스 부호를 이용하여 부호화 한다. 각 시공간 트렐리스 부호에 의해 부호화된 신호들을 편위상 STTC 그룹으로 정의할 것이다. 시공간 트렐리스 부호(STTC)에 의해 부호화된 신호는 변조한 후 각각의 송신 안테나를 통해 동시에 전송한다.

2. 수신단

송신단에서, 여러 개의 시공간 트렐리스 부호를 이용하여 다른 정보를 부호화하는 구조를 가지고 있기 때문에 이에 적합하도록 두 가지 형태의 계층화 수신기 구조를 제안하였다. 그림 2(a)의 LSTT-MMSE와 그림 2(b)의 LSTT-Whitening이 본 논문에서 제안하고 있는 수신기 구조이다. 그림 2(a), LSTT-MMSE는 신호를 interference nulling (MMSE) 과정에 의해 STTC 그룹

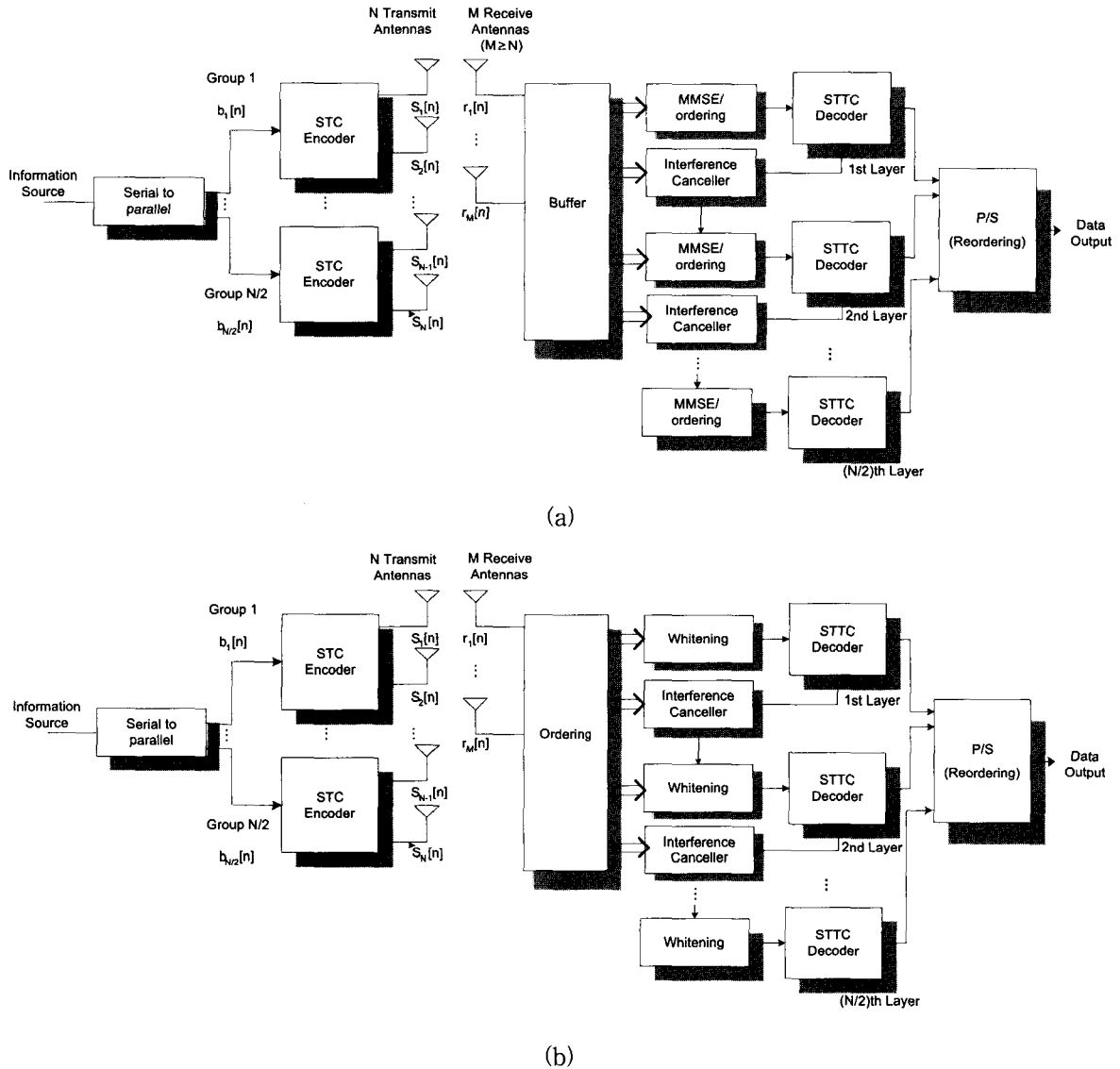


그림 2. 계층화 시공간 구조와 시공간 부호를 결합한 시스템 (a) LSTT-MMSE (b) LSTT-Whitening
 Fig. 2. The system combined layered space-time structure and space-time trellis code.

으로 분류한 다음 STTC 복호기를 통해 복호하고 수신 신호에서 복호 과정이 끝난 신호의 정보를 제거한다. 이 과정은 모든 송신 신호를 복호할 때까지 반복된다. 그림 2(b), LSTT-Whitening은 그림 2(a) 구조에서 더 높은 다이버시티 이득을 얻기 위해 MMSE를 whitening으로 대체한 구조이다.

가. LSTT-MMSE

각 수신 안테나로 수신된 신호는 레일레이 페이딩 (Rayleigh fading)과 열잡음(thermal noise)에 의해 손상을 입은 N 개의 송신 신호의 합으로 표현된다. 이때, 본 논문에서는 채널을 quasi-static 페이딩 채널이라고

가정하였다. 그러면, 수신 신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{r}[n] = \mathbf{H} \mathbf{s}[n] + \mathbf{w}[n] \tag{1}$$

여기서, $\mathbf{r}[n] = [r_1[n], \dots, r_M[n]]^T$ 은 $M \times 1$ 수신 신호 벡터이고, $\mathbf{w}[n] = [w_1[n], \dots, w_M[n]]^T$ 은 $M \times 1$ 열잡음 벡터를 의미하며 $\mathbf{s}[n] = [s_1[n], \dots, s_N[n]]^T$ 는 $N \times 1$ 송신 벡터를 나타낸다.

그리고, $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ h_M & \dots & h_{MN} \end{pmatrix}$ 는 $M \times N$ 페이딩 채널

매트릭스이다. 이때, h_{ij} 는 j 번째 송신 안테나와 i 번째 수신 안테나 사이의 페이딩 이득을 의미한다.

STTC 그룹을 분류하기 위한 MMSE nulling은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{G}_g = \mathbf{I}_g \mathbf{H}^H \left(\mathbf{H} \mathbf{H}^H + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_d^2} \mathbf{I} \right)^{-1} \quad (2)$$

여기서, σ_n^2/σ_d^2 은 신호 대 잡음비의 역수이고, \mathbf{I}_g 는 g 번째 STTC 그룹을 분류하기 위한 $2 \times N$ 매트릭스이다. '2'는 하나의 STTC 그룹과 관련된 송신 안테나가 2개임을 의미하는 수로 STTC 그룹과 관련된 송신 안테나의 개수에 따라 바뀔 수 있다. \mathbf{I}_g 의 간단한 예로

$$\mathbf{I}_1 \text{을 생각하면, } \mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & 0 & \cdots \end{bmatrix} \text{로 표현된다.}$$

나. LSTT-Whitening

whitening 과정을 설명하기 위해서 (1)과 다르게 STTC 그룹 단위로 수신 신호를 표현해야 한다. 그러면 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{r}[\mathbf{n}] = \mathbf{H}_1 \mathbf{s}_1[\mathbf{n}] + \cdots + \mathbf{H}_{N/2} \mathbf{s}_{N/2}[\mathbf{n}] + \mathbf{w}[\mathbf{n}] \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{H}_g = \begin{pmatrix} h_{1,(2g-1)} & h_{1,(2g)} \\ \vdots & \vdots \\ h_{M,(2g-1)} & h_{M,(2g)} \end{pmatrix}$ 는 g 번째

STTC 그룹에 영향을 주는 페이딩 채널 매트릭스이고 $\mathbf{s}_g[\mathbf{n}] = [s_{2g-1}[\mathbf{n}] \ s_{2g}[\mathbf{n}]]^T$ 는 g 번째 STTC 그룹의 송신 신호 벡터이다.

우선, $\mathbf{s}_1[\mathbf{n}]$ 을 먼저 복호하자고 한다면, $\mathbf{u}[\mathbf{n}] = \mathbf{H}_2 \mathbf{c}_2[\mathbf{n}] + \cdots + \mathbf{H}_{N/2} \mathbf{c}_{N/2}[\mathbf{n}] + \mathbf{w}[\mathbf{n}]$ 은 시·공간적으로 서로 연관되어 있는 유색잡음(colored noise)이다. 이때, Whitening 과정은 $\mathbf{R}_u[\mathbf{n}] = E\{\mathbf{u}[\mathbf{n}] \mathbf{u}^H[\mathbf{n}]\} = \mathbf{D} \mathbf{D}^H$ 에서 얻어지는 \mathbf{D}^{-1} 로 표현할 수 있다. Whitening을 한 후의 결과 $\mathbf{D}^{-1} \mathbf{r}[\mathbf{n}]$ 를 이용하여 STTC 복호기에서는 다음 함수에 의해 $b_1[\mathbf{n}]$ 을 복호할 수 있다.

$$C(\mathcal{D}_1[\mathbf{n}]) = \|\mathbf{D}^{-1} \mathbf{r}[\mathbf{n}] - \mathbf{D}^{-1} \mathbf{H}_1 \mathbf{s}_1[\mathbf{n}]\|^2 \quad (4)$$

여기서, $\|\cdot\|^2$ 은 Euclidean norm이다. 비터비(Viterbi) 복호기에서는 (4)식을 최소화하는 정보 비트들을 선택한다.

3. 복호 순서

계층화 수신기는 여러 개의 계층(layer)으로 나누어

검출 과정을 수행하기 때문에 처음 계층(layer)에서의 성능이 수신기의 성능을 좌우한다. 뿐 아니라, 앞 단계의 계층(layer)이 다음 단계의 계층(layer)보다 성능에 더 많은 영향을 준다^[5]. 이런 이유 때문에 제안된 계층화 수신기에서 어느 송신 STTC 그룹을 먼저 복호할 것인가에 대한 순서를 결정하는 것은 전체 성능에 영향을 주는 중요한 요소가 된다.

복호할 송신 STTC 그룹의 순서는 간섭 억제(interference suppression)방법으로 MMSE를 사용한 경우와 Whitening을 사용한 경우에 따라 다른 방식으로 진행된다. MMSE를 사용한 경우는 MMSE nulling 매트릭스를 고려하여 MMSE 과정에서 신호를 검출한 후 (post-detection)의 SNR 중에 큰 값을 갖는 STTC 그룹을 선택하는 방법으로 순서를 결정한다. (5)는 i 번째 계층에서 복호될 STTC 그룹을 표현한 것이다.

$$k_i = \arg \min_{g(\neq k_m)} \|(\mathbf{G}_g)_i\|^2 \quad (5)$$

여기서, $m = 0, \dots, i-1$ 이고, g 는 STTC 그룹 인덱스이다. 이 방법은 MMSE 과정을 실행한 후의 SNR을 이용하여 복호 순서를 정하는 방법이기 때문에 매 계층마다 MMSE 과정 후 실행해야 한다.

Whitening의 경우는 whitening을 실행한 전후의 SNR 변화가 없기 때문에 whitening 과정 전 입력 SNR에 의해 순서를 결정한다. 각 부호어(codeword)의 평균 송신 전력이 동일하다고 가정하면, 각 STTC 부호어(codeword)의 수신 전력은 채널 매트릭스 \mathbf{H} 에 의해 결정된다. 채널 값은 각 부호어(codeword)의 Euclidean 거리(distance)를 변화시키기 때문에 복호 순서는 각 STTC 그룹에 영향을 주는 채널의 Euclidean norm $\|\mathbf{H}_g\|^2$ 에 의해 결정된다. i 번째 계층에서 복호될 STTC 그룹을 결정하는 수식은 다음과 같다.

$$k_i = \arg \max_{g(\neq k_m)} \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^M |h_{j(2g+l-2)}|^2 \quad (6)$$

여기서, $m = 0, \dots, i-1$ 이고, N_g 는 g 번째 STTC 그룹과 관련 있는 수신 안테나 수이다. 이 경우는 Whitening을 실행하기 전에 복호 순서를 결정하기 때문에 첫 번째 계층이 시작되기 전에 복호 순서를 한번만 결정하면 된다.

IV. 모의 실험 결과

본 논문에서는 (4, 3) MIMO 시스템과 (4, 4) MIMO

시스템을 고려한다. 시공간 계층화 구조 (layered space-time architecture)와 시공간 트렐리스 부호 (STTC)를 결합시킨 시스템에서 시공간 트렐리스 부호로 [3]에서 제안한 4-state 4-PSK 시공간 트렐리스 부호를 사용하였다. 모의실험에서 사용한 부호보다 더 많은 송신 안테나 수와 더 복잡한 구조를 가지고 있는 시공간 트렐리스 부호에 대해서도 확장이 가능하다. 한 프레임에는 130 심볼이 있다고 가정한다. 채널은 quasi-static 페이딩 채널로 가정하고, 이 채널 정보는 수신 단에서만 정확히 추정(estimation)할 수 있다고 가정한다.

그림 3은 ordering과정 존재 여부에 따라 (4, 4) LSTT-MMSE와 (4, 3) LSTT-MMSE의 성능을 비교한 결과이다. LSTT-MMSE는 MMSE nulling 과정을 가지고 있기 때문에 (5)의 복호순서 결정 방법을 적용하였다. ordering 과정을 이용한 (4, 4) LSTT-MMSE는 ordering 과정을 이용하지 않은 (4, 4) LSTT-MMSE에 비해 10^{-2} FER에서 7.5dB 이득을 가진다. 이것은 복호 순서를 결정하는 것이 LSTT-MMSE의 성능에 많은 영향을 준다는 것은 말한다. 3개의 수신 안테나를 사용하는 경우는 디버시티 이득이 충분하지 않기 때문에 irreducible error가 발생하여 원하는 FER를 얻을 수 없다.

그림 4는 ordering 과정 존재 여부에 따라 (4, 4) LSTT-Whitening과 (4, 3) LSTT-Whitening의 성능을 비교하였다. LSTT-Whitening의 경우 간섭 억제(interference suppression) 방식으로 whitening을 사용하고 있기 때문에 (6)의 복호순서 결정 방법을 이용하였다. ordering 과정을 수행한 (4, 4) LSTT-Whitening은 ordering 과정을 수행하지 않는 (4, 4) LSTT-Whitening에 비해 10^{-2} FER에서 2dB 이득을 보인다. 수신 안테나가 3개인 경우, ordering 과정을 수행한 (4, 3) LSTT-Whitening은 ordering 과정을 수행하지 않는 (4, 3) LSTT-Whitening에 비해 10^{-2} FER에서 3dB 이득을 가진다.

그림 5는 LSTT-MMSE와 LSTT-Whitening 사이의 성능을 비교한 결과를 보여준다. 이 결과는 모두 복호순서 결정 과정을 수신기에 적용한 것이다. LSTT-MMSE는 (5)의 복호순서 결정 방법을 적용했고, LSTT-Whitening은 (6)의 복호순서 결정 방법을 적용하였다. 결과 그래프에 ls_coded라고 표시된 것은 그림 1의 부호화된 계층화 시공간 구조를 의미한다. 이때, 사용된 채널 부호는 (2, 1, 5) 길쌈부호(convolutional

code)로 4-PSK, 4-state 시공간 부호의 복잡도를 고려하여 선택하였다. ls_coded의 결과도 [5]에서 제시한 최적의 복호순서 결정 방식을 적용한 것이다.

(4, 4) LSTT-MMSE는 10^{-2} FER에서 (4, 4) ls_coded와 유사한 성능을 보인다. (4, 3) LSTT-Whitening은 (4, 4) ls_coded에 비해 10^{-2} FER에서 1dB 이득을 가지고 있다. 결국, (4, 3) LSTT-Whitening은 (4, 4) LSTT-MMSE에 비해 10^{-2} FER에서 1dB 이득을 가진다. 이것은 LSTT-Whitening이 LSTT-MMSE에 비해 첫 번째 계층(layer) 복호 과정에서 더 큰 디버시티 이득을 얻기 때문에 (4, 3) LSTT-Whitening이 (4, 4) LSTT-MMSE에 비해 더 나은 성능을 보이는 것이다.

V. 결 론

계층화 시공간 구조(layered space-time processing)와 시공간 트렐리스 부호(space-time trellis code)를 결합한 시스템에 적합한 두 개의 계층화 수신기 구조를 제안하였다. 하나는 간섭 억제(interference suppression) 방식으로 MMSE nulling을 사용한 LSTT-MMSE이고, 다른 하나는 MMSE nulling 대신 whitening 과정을 적용한 LSTT-Whitening이다.

LSTT-MMSE와 LSTT-Whitening이 모두 계층화 구조를 가지고 있기 때문에 각 STTC 그룹의 복호순서는 전체 성능에 많은 영향을 준다. 그러므로, 제안된 수신기에서는 각각의 간섭 억제(interference suppression) 방식에 따라 다른 복호순서 결정 방법을 적용하였다.

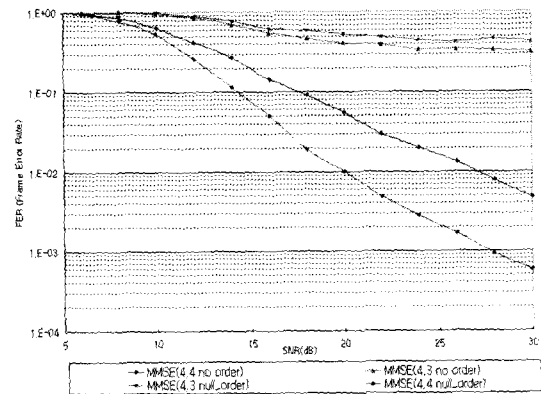


그림 3. ordering 과정의 존재 유무에 따른 LSTT-MMSE의 FER 성능
Fig. 3. The FER performance of LSTT-MMSE with/without ordering process.

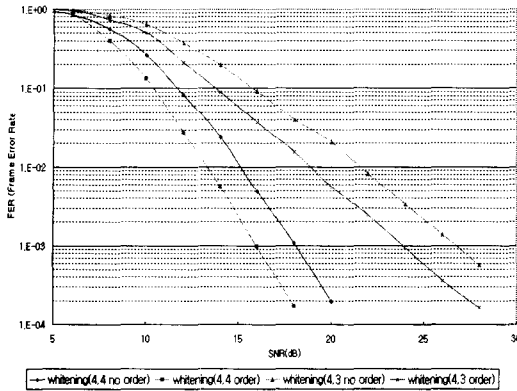


그림 4. ordering 과정의 존재 유무에 따른 LSTT-Whitening의 FER 성능
 Fig. 4. The FER performance of LSTT-Whitening with/without ordering process

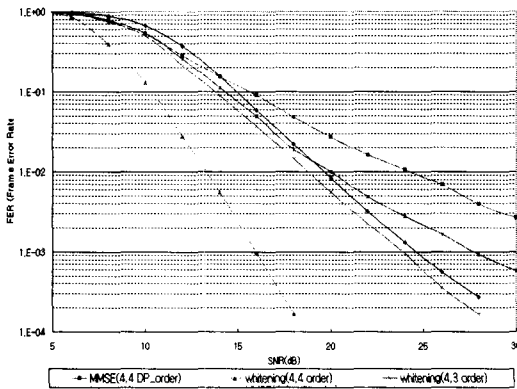


그림 5. ordering 과정을 가지고 있을 때의 LSTT-Whitening과 LSTT-MMSE의 성능
 Fig. 5. The performance of LSTT-Whitening and LSTT-MMSE employing ordering process

참고 문헌

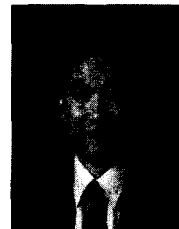
- [1] D. D. N. Bevan, R. Tanner, C. R. Ward, "Space-Time Coding for Capacity Enhancement in Future-Generation Wireless Communications Networks," Capacity and Range Enhancement Techniques for the Third Generation Mobile Communications and Beyond (Ref. No. 2000/003), IEE Collouium on, pp. 8/1 -8/11, 2000
- [2] V. Tarokh, H. Jafarhani, and A. R. Calderbank, "Space-Time Block Coding for Wireless Communications: Performance Results," IEEE Journal on Selected areas. comm. Vol. 17, No. 3, pp. 451-460, March 1999
- [3] Vahid Tarokh, Nambi Seshadri, and A. R. Claderbank, "Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction," IEEE trans. inform. theory, vol. 44, No. 2, pp. 744-765, March 1998
- [4] Gerard J. Foschini, "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a fading Environment When Using Multi-Element Antennas," Bell Labs Technical Journal, Autumn 1996
- [5] P.W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel," ISSSE 98, pp. 295 -300, 1998

저 자 소 개



임 은 정(정회원)
 1998년 2월 연세대학교 전과공학과 졸업(공학사)
 1998년 3월~2000년 2월 연세대학교 전기컴퓨터공학과 졸업(석사)
 2000년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<주관심분야: 채널부호 기술, Space-Time Codes, MIMO 시스템, channel estimation, CDMA 이동통신>



김 동 구(정회원)
 1985년~1991년 University of Southern California Research Assistant
 1992년~1994년 Cellular Infrastructure group. Motorola, Fort Worth, Tx

1999~현재 Qualcomm Yonsei Joint Research Program 책임교수
 2002~현재 연세대학교 전과통신연구소 부소장.
 1994년~현재 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 조교수, 부교수

<주관심분야: CDMA 이동통신, Multiple Access 기술, 변조 및 채널 코딩기술, Scheduleing/MAC 기술, Forward Link Beamforming 기술 및 MIMO 기술, UWB, Binary CDMA>