

빠른 레일리 페이딩채널에서 MTCM 부호와 STBC를 결합한 시스템의 성능평가

Performance of the Concatenated System of MTCM Codes with STBC on Fast Rayleigh Fading Channels

진익수*
(Ik-Soo Jin)

요약

STBC는 부호이득을 얻을 수 없지만, 비교적 적은 부호기와 복호기의 복잡도를 가지고 완전한 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 따라서 STBC는 부호이득이 없기 때문에 부호이득을 얻을 수 있는 외부 부호와 결합되어 사용되어야 한다.

본 논문에서는 완전한 다이버시티 이득과 함께 상당한 부호이득을 얻기 위하여, MTCM부호와 STBC를 결합한 시스템을 고려하였다. 공정한 성능 비교를 위하여 동일한 전송 전력, 동일한 대역폭 효율 그리고 동일한 상태 수를 전제하고, 고려한 시스템과 기존에 알려진 STTC부호와 FER 성능 비교를 실시하였다. 모의실험 결과, MTCM부호와 STBC를 결합한 시스템의 성능은 빠른 레일리 페이딩 채널에서 2개의 송신기 안테나와 1개의 수신기 안테나를 사용하는 STTC부호 보다 우수한 성능을 보여주었다.

Abstract

Space-time block codes (STBC) have no coding gain but they provide a full diversity gain with relatively low encoder/decoder complexity. Therefore, STBC should be concatenated with an outer code which provides an additional coding gain.

In this paper, we consider the concatenation of multiple trellis-coded modulation (MTCM) codes with STBC for achieving significant coding gain with full antenna diversity. Using criteria of equal transmit power, spectral efficiency and the number of trellis states, the performance of concatenated scheme is compared to that of previously known space-time trellis codes (STTC) in terms of frame error rate (FER). Simulation results show that MTCM codes concatenated with STBC offer better performance on fast Rayleigh fading channels, than previously known STTC with two transmit antennas and one receive antenna.

Key words: STBC, MTCM, STTC, fast fading, rayleigh fading

† 이 논문은 2009년도 경남대학교 학술논문게재 연구비 지원으로 이루어졌음.
* 주저자 : 경남대학교 정보통신공학과 부교수(교신저자)
† 논문접수일 : 2009년 11월 10일
† 논문심사일 : 2009년 12월 12일
† 게재확정일 : 2009년 12월 14일

I. 서 론

시공간부호(space-time code)는 고품질, 고속의 데이터전송과, 더 나은 스펙트럼 효율성 및 전력의 효율성을 얻기 위해 복수개의 송신 안테나를 사용하여 다이버시티 이득을 얻는 방법이다. 시공간 부호는 크게 시공간 블록부호(Space-Time Block Codes; STBC)와 시공간 트렐리스부호(Space-Time Trellis Codes; STTC) 등으로 분류된다. STBC는 Alamouti [1]에 의해 처음으로 제안된 이후 많은 연구가 진행되어 왔다 [2].

STTC는 Tarokh 등[3]에 의해 처음으로 소개되었으며, 다이버시티 이득과 부호 이득을 동시에 얻을 수 있으나, 높은 차수의 변조기법을 채택함에 있어 제약이 있고, 높은 차수의 변조기법에 대해서 성능이 좋은 부호를 찾는 데 어려움이 있다. Firmanto 등은 빠른 페이딩 채널에서 Tarokh 등이 제시한 STTC부호의 설계기준을 이용하여 4-PSK(pahse shift keying), 8-PSK 변조방식을 사용한 4-32상태의 개선된 STTC 부호를 제시하였다 [4].

STBC 부호는 통상적인 오류정정 블록부호들과 달리 다이버시티 이득 외에 자체적으로 부호 이득을 얻을 수 없는 구조이므로 STBC가 추가적인 이득을 얻기 위해서 또 다른 부호이득을 제공하는 외부부호(outer code)들과 결합되어 사용되어야만 한다. Alamouti의 STBC 구조는 다른 여러 부호화 기법들과 쉽게 결합할 수 있다는 장점이 있다. 또한 높은 부호 이득을 얻을 수 있는 외부부호를 선택하여 결합하는 경우에, 완전 다이버시티 이득과 더불어 결합된 외부부호로 부터 부호 이득도 얻을 수 있기 때문에 STTC와 비교될 수 있는 기법이다. 따라서 현실적인 구현의 문제점을 STBC를 통하여 해결할 수 있으면서 성능이 보다 우수하고 STBC 구조와 적합한 외부 부호 기법을 찾을 수 있다면 무선 통신 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 방안이 될 수 있다.

TCM(Trellis Coded Modulation)은 부호화 기법의 일종으로 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템에 적용이 가능하다 [5]. Divsalar 등은 하나의 트렐리스 가지에 k^* 개의 M-ary 신호를 할당하는 방식으

로 페이딩 채널에서 우수한 성능을 보이는 MTCM (Multiple Trellis Coded Modulation) 방식을 제안하였다 [6]. MTCM 부호는 Ungerboeck 의 TCM 부호[7]에 비해 더 큰 설계변수 값을 가지며, 페이딩 채널에서 FER(Frame Error Rate) 성능도 더 우수하다.

TCM 혹은 MTCM 을 외부 부호로 사용하여 STBC를 결합한 시스템에 대한 논문은 그동안 지속적으로 발표되어왔다 [8-11]. Gong 등은 TCM을 외부 부호로 사용한 시스템에 대하여 준정적 페이딩 채널에서 성능분석과 시뮬레이션을 수행하였으며, Tarokh 등의 STTC부호와 FER 성능을 비교하였으며, TCM과 STBC를 결합한 시스템의 성능이 Tarokh 등의 STTC부호의 성능보다 우수하였음을 입증하였다 [9]. Uysal 등은 2-상태 8-PSK MTCM을 외부 부호로 고려하여 새도우 라이시안 페이딩에서 성능평가를 수행하였다 [10]. Shah 등은 4상태 8-PSK MTCM을 외부 부호로 고려하여 준정적 페이딩과 블록 페이딩에서 성능평가를 수행하였다 [11].

따라서 본 논문에서는 다이버시티 이득과 부호 이득을 같이 얻을 수 있는 다양한 TCM 혹은 MTCM 부호와 결합한 STBC 시스템 모델에 대하여 빠른 레일리 페이딩 채널에서 모의실험을 수행하고 Tarokh 등과 Firmanto 등의 STTC 부호와 FER성능을 비교하고자 한다.

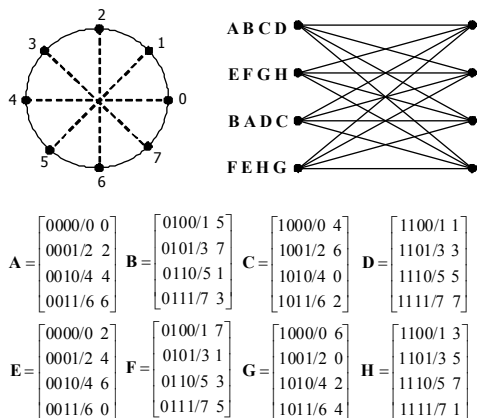
II. 시스템 모델

1. MTCM 부호

Ungerboeck의 TCM [7] 은 부호화에 의해 증가된 잉여심볼을 신호 집합의 확장을 통해 수용하므로 대역폭 확장이 발생하지 않고 부호 이득을 얻을 수 있는 장점을 지니고 있으며, 일반적으로 신호 집합을 확장함에 있어서 신호 집합을 2배로 확장할 경우 가장 많은 채널 용량의 증가를 얻을 수 있음이 알려져 있다. 따라서 주파수 효율 2 bits/s/Hz의 부호를 얻기 위해서 TCM및 MTCM은 8-PSK 신호 집합을 사용하게 된다. 반면 시공간 트렐리스 부호는 신호 집합의 확장이 아닌 공간 차원에서 안테나 개수를 확장함으

로써 2 bits/s/Hz의 주파수 효율을 얻기 위해 4-PSK 신호 집합을 사용하게 된다.

MTCM은 TCM 부호와 달리 트렐리스 선도의 한 가지에 두개 이상의 채널 신호를 대응시키며, 채널에 따라 설계방법이 다르게 된다. TCM은 자유거리 d_{free} 가 최대가 되도록 설계하여 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널에 대해서는 좋은 성능이 나오지만, 페이딩 채널에서 TCM의 성능은 d_{free} 보다는 최소 유효거리(minimum effective length) δ_{min} 과 최소 곱거리(product distance) pd_{min} 의 영향을 더 크게 받는다. 이것은 페이딩 채널에서는 TCM의 성능을 나타내는 BER (bit Error Rate) 이 δ_{min} 과 pd_{min} 에 반비례하기 때문이다. TCM부호의 경우 병렬 천이 가 있는 트렐리스 선도의 한 가지에는 하나의 채널 신호가 대응되어 $\delta_{min}=1$ 일 수 있지만, MTCM 경우에는 k^* 개의 M-ary 채널 심볼이 하나의 가지에 대응되므로 $\delta_{min}=k^*$ 가 되므로 페이딩 채널에서는 MTCM 부호가 TCM 부호보다 더 우수한 성능을 얻게 된다. TCM 부호는 $k^*=1$ 인 MTCM 부호의 특수한 경우라고 말할 수 있다.



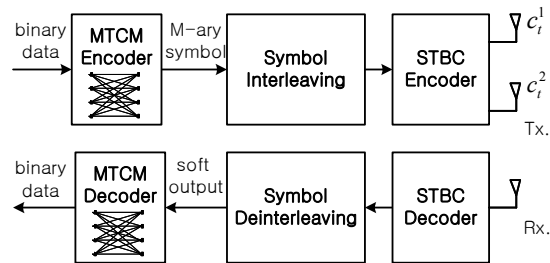
Input bits/ output 8-PSK symbols

<그림 1> 8-PSK 신호좌표와 부호율 4/6 ($k^*=2$), 4-상태, 8-PSK MTCM 부호의 트렐리스 선도.
<Fig. 1> 8-PSK signal constellation and trellis diagram of 8-PSK MTCM code with code rate 4/6 ($k^*=2$), 4-state.

<그림 1>은 Divsalar 등이 제안한 4-상태, 8-PSK 신호 집합을 사용하는 MTCM 부호의 트렐리스 선도이다 [6].

2. 송신기와 수신기 모델

2 개의 송신 안테나($n_T=2$)와 1개의 수신 안테나($n_R=1$)를 사용한다 가정하면 MTCM과 STBC를 결합한 시스템은 <그림 2>와 같다. <그림 2>에서 전송하고자 하는 정보가 MTCM 부호기에 입력되면 부호화된 M-ary 심볼이 출력된다. 출력된 심볼은 연립 오류를 분산시키기 위해 크기 N 인 블록 인터리빙에 의해 심볼 단위의 인터리빙이 수행된다. 인터리빙된 심볼들은 STBC 부호기에 의해 시공간 부호로 부호화되며, 이 과정에 의해 하나의 송신안테나를 위해 설계된 MTCM을 다중 안테나에 사용할 수 있게 된다. 각 안테나에서 수신된 신호는 선형 결합기를 통하여 1차원 신호로 변환되며 비터비 알고리즘에 의해 전송된 신호를 복원할 수 있다. 수신기는 채널의 상태정보를 완벽하게 알고 있다고 가정을 하였다.



<그림 2> 송신기와 수신기 모델.

<Fig. 2> Transmitter and receiver model.

3. 채널 모델

송수신기의 이동은 전송경로를 변화시키기 때문에 채널은 시변적이 된다. 채널의 특성이 송수신기의 위치에 의존적이므로 시간적인 변이는 곧 공간적인 변이가 된다. 모바일의 속도를 v , 신호의 파장을 λ 라 하면, 도플러 확산(Doppler spread)은 $f_d = v/\lambda$

의 관계식으로 구할 수 있다. 만일 송수신기가 거리가 가까워지는 방향으로 이동하면 f_d 는 양수값을 가지며, 멀어지는 방향으로 이동하면 음수값을 갖는다. 채널의 시변적인 특성이나 페이딩의 속도는 느린 페이딩과 빠른 페이딩의 2가지로 구분할 수 있다. 느린 페이딩은 채널의 상관성 있는 특성이 유지되는 시간이 전송 심볼의 주기에 비해 긴 경우에 발생한다. 느린 페이딩 채널에서는 심볼이 전송되는 동안 채널의 특성이 거의 일정하게 유지된다고 예상할 수 있다.

빠른 페이딩은 채널이 상관되어 동작하는 지속시간이 심볼의 주기에 비해 짧은 상황을 말한다. 따라서 빠른 페이딩 채널에서는 기저대역 펄스에 왜곡을 주는 채널의 특성이 한 심볼 주기 동안에도 여러번 변할 수 있다. 본 논문에서는 한 개의 시공간 블록(즉, 2심볼) 동안은 페이딩 특성이 크게 변하지 않는 빠른 페이딩 채널로 가정하였으며, 중심주파수는 2GHz, 모바일의 속도는 $v=120km/h$ 로 설정하였다.

<그림 2>에서 채널을 통해 각 안테나에 수신된 신호는 식 (1)과 같이 정의 할 수 있다.

$$r_i = \sum_{i=1}^{N_T} h_i^i c_i^i \sqrt{E_s} + \eta_i \quad (1)$$

여기서 h_i^i 는 i 번째 송신 안테나에서 전송된 신호에의 복소 가우시안 채널의 경로이득이다. c_i^i 는 시간 t 에서 i 번째 송신 안테나를 통해 전송된 시공간 부호화된 STBC 심볼을 나타내며, E_s 는 전송 심볼당 에너지를 나타낸다. η_t 는 시간 t 에서 수신된 신호에 영향을 주는 가우시안 잡음으로 평균이 0 이고 차원당 분산이 $N_0/2$ 인 독립적인 복소 가우시안 랜덤변수로 모델링 한다.

III. 빠른 레일리 페이딩채널에서 MTCM 부호와 STTC 부호의 설계변수

AWGN 채널과 레일리 페이딩 채널이 서로 양극단에 있는 채널이라고 말한다면, 라이시안 페이딩 채널은 그 중간쯤에 위치하는 채널이라고 말할 수

있다. 실제로 라이시안 확률밀도함수는 페이딩지수 K_f 로 표현 될 수 있으며, K_f 는 다중경로에 의한 간섭과 신호의 전력에 대한 지배적인 직접파 신호의 전력의 비로 정의할 수 있다. $K_f=0$ 이면 레일리 페이딩 채널이 되며, $K_f \rightarrow \infty$ 이면 AWGN 채널이 된다.

TCM 혹은 MTCM 부호의 설계기준은 채널마다 다르다. AWGN 채널에서는 자유거리 d_{free}^2 를 최대화 하는 것이며, 레일리 페이딩 채널에서는 최소 유효거리(effective length, δ_{min})와 최소의 거리곱(pd_{min})을 최대화 하는 것이다. 레일리 페이딩 채널에서 자유거리 d_{free}^2 은 그다지 중요한 설계기준이 되지 못한다 [12]. 이는 MTCM부호의 탄생 기반이 된다. Ungerboeck TCM은 d_{free}^2 를 설계기준으로 삼았으며, MTCM부호는 레일리 페이딩 채널에서의 설계 기준인 δ_{min} 과 pd_{min} 를 설계기준으로 삼았다. 라이시안 페이딩 채널이나 SNR(Signal to Noise Ratio)이 중간값일 때 δ_{min} 과 pd_{min} 외에 d_{free}^2 도 영향을 주게 된다. 이를 위하여 Periyalwar 등은 수정된 MTCM을 제시하였다 [13].

MTCM부호와 STBC를 결합한 시스템과 비교대상인 STTC부호의 설계기준은 빠른 페이딩과 느린 페이딩일 때가 다르다. Tarokh등은 느린 레일리 페이딩 채널과 빠른 레일리 페이딩 채널 각각에 대하여 pairwise 오율 $p_i(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}})$ 를 유도하였다. 빠른 레일리 페이딩 채널에서의 pairwise 오율 수식은 다음과 같다[3, 식(17)].

$$p_i(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) \leq \prod_{t \in \eta} \left(|x_t - \hat{x}_t|^2 \frac{E_s}{4N_0} \right)^{-n_B} \quad (2)$$

식 (2)에서 η 는 $1 \leq t \leq l$ 인 경우에 대하여 $|x_t - \hat{x}_t| \neq 0$ 을 만족하는 t 의 집합을 나타내며 $|\mathbf{x}_t - \hat{\mathbf{x}}_t| = \sum_{i=1}^m |x_t^i - \hat{x}_t^i|^2$ 이다. 식 (2)에서 η 를 구성하는 모든 원소의 개수를 유효 거리를 δ 라고 정의하고 $\prod_{t \in \eta} |x_t - \hat{x}_t|^2$ 를 거리곱(product distance)을 pd 라 정의 하면 식 (2)은 식 (3)과 같이 표현 된다.

$$p_l(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) \leq pd^{-n_r} \times \left(\frac{E_s}{4N_0} \right)^{-n_r \delta} \quad (3)$$

식 (3)에서 STTC 부호는 $n_r \delta$ 차수의 다이버시티 이득을 얻을 수 있으며 유효 거리 δ 가 클수록 부호의 다이버시티 이득이 향상됨을 알 수 있다. 따라서 가능한 모든 부호어 쌍 \mathbf{x} 와 $\hat{\mathbf{x}}$ 에 대하여 최소 유효거리 δ_{\min} 에 의해 다이버시티 이득이 결정되며 좋은 성능을 가지는 부호는 δ_{\min} 이 큰 부호이다. 또한, $pd^{1/\delta}$ 는 SNR의 증감 효과를 나타내므로 부호 이득으로 나타나며 pd 가 클수록 많은 부호 이득을 얻을 수 있다. 부호 이득은 가능한 모든 부호어 쌍 \mathbf{x} 와 $\hat{\mathbf{x}}$ 에 대하여 최소의 거리값 pd_{\min} 에 의해 결정되며 부호 이득이 최대인 부호는 pd_{\min} 이 최대가 되는 부호이다.

따라서 빠른 레일리 페이딩 채널에서 MTCM부호와 STTC부호의 설계기준은 서로 동일하며 최소 유효거리(δ_{\min})와 최소의 거리값(pd_{\min})을 최대화 하는 것임을 확인 할 수 있다.

IV. 모의실험 및 결과

본 논문에서 고려한 시스템 모델의 성능을 평가하기 위해 빠른 레일리 페이딩 채널에서 MTCM 부호와 STBC 부호가 결합된 시스템 모델에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 프레임 길이는 20ms로 하였으며 한 프레임내의 데이터 비트 수는 192bits로 설정하였다. 심볼단위의 12x8 블록인터리버가 사용되었으며, 중심주파수는 2GHz, 모바일의 속도는 $v = 120km/h$ 이다. 수신기에서는 채널 상태정보가 완전하게 알려져 있다고 가정하였다. 성능을 비교하기 위한 척도로서 프레임 오류(FER)를 사용하였다. STBC의 외부부호로 사용한 TCM 부호 혹은 MTCM 부호의 파라미터를 <표 1>에 정리하였다.

Code 1과 Code 2는 Ungerboeck TCM [7], Code 3과 Code 4는 Divsalar 등의 MTCM [6], Code 5는 Periyalwar 등의 MTCM [11]을 사용하였다. <그림 3>은 빠른 레일리 페이딩 채널에서 STBC의 외부부호

로 사용된 <표 1>의 TCM 및 MTCM 부호들의 FER

Parameters	Code #	State (m)	M-PSK	Code Rate (R)	k	Throughput (r) [bits/sec/Hz]	d_{free}^2	δ_{\min}	pd_{\min}^d
TCM	1	2	4	1/2	1	1	6.00	2	8
	2	4	8	2/3	1	2	4.00	1	4
MTCM	3	2	8	4/6	2	2	2.34	2	2
	4	4	8	4/6	2	2	2.34	2	4
	5	4	8	4/5	2	2	3.77	2	4

<표 1> 모의실험에 사용된 TCM 혹은 MTCM 부호의 파라미터.

<Table 1> Parameters of TCM or MTCM codes for simulations.

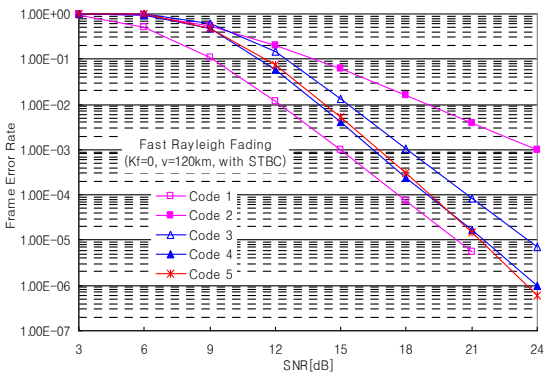
성능을 서로 비교한 것이다. <그림 4>는 STBC와 결합된 MTCM 부호들과 비교대상인 STTC 부호의 FER 성능을 나타낸 그림이며, <그림 5>는 STBC와 결합된 TCM 부호들과 비교대상인 STTC 부호의 FER 성능을 나타낸 그림이다. <그림 4>와 <그림 5>에서 Code_T는 Tarokh 등의 STTC부호 [3]를, Code_F는 Firmanto 등의 STTC부호 [4]를 나타낸다. 공정한 성능 비교를 위하여 동일한 전송 전력, 동일한 대역폭 효율(throughput) 그리고 동일한 상태 수를 전제하고, 고려한 시스템과 STTC부호의 성능 비교를 실시하였다.

Code 1 경우는 대역폭 효율이 1 이더라도 STBC 시스템에 적용된 후에는 Code 4, 5의 MTCM 부호들을 결합한 STBC 시스템의 특성들과 비교할 때 SNR이 증가함에 따라 그 차이가 줄어들다는 것을 <그림 3>에서 보여주고 있다. 이것은 STBC 시스템과 결합하지 않은 경우에 나타난 결과와 비슷한 성능 차이를 나타내고 있다. 그리고 대역폭 효율이 2인 TCM 부호를 적용한 STBC 시스템인 Code 2에 비하여 Code 4와 Code 5가 FER= 10^{-2} 에서 약 5[dB] 정도 우수하게 나타나고 있다.

<그림 4>에서 STBC와 상태수가 4인 MTCM 부호(Code 4, Code 5)를 결합할 경우 STTC 부호에 비해 FER= 10^{-2} 에서 약 7[dB] 이상 월등하게 향상되는 것을 알 수 있다. 이러한 이득은 고려한 시스템이 부가적인 다이버시티 이득과 부호이득을 얻은 것 때문에 발생한 것이다. 그리고 Code 4와 Code 5의 성능 그래프가 SNR=21[dB] 근처에서 서로 교차하는 것을

볼 수 있다. 따라서 STBC와 결합해서 MTCM 부호를 사용하더라도, SNR이 높을 때에는 Periyalwar 등의 MTCM 부호(Code 5)가 Divsalar 등의 MTCM 부호(Code 4) 보다 여전히 성능이 더 우수하다는 특성이 그대로 유지된다는 것을 알 수 있다. 또한 Firmanto 등의 STTC부호는 빠른 페이딩 채널에서 Tarokh 등의 STTC부호 보다 설계변수가 더 큰 값을 가지기 때문에 FER 성능 또한 더 우수하다는 참고문헌 [4]의 결과를 다시 한번 확인 할 수 있다.

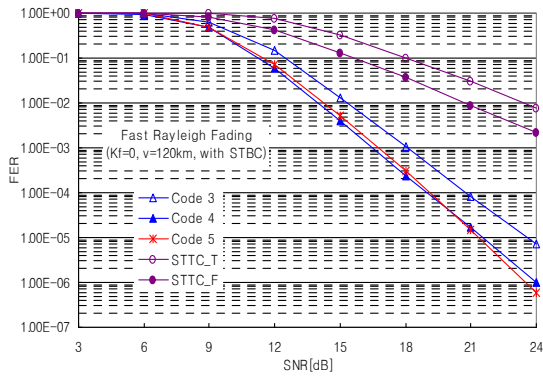
<그림 5>는 Code 2인 Ungerboeck TCM 부호를 적용한 STBC 시스템의 경우에 STTC_T에 비하여 약 5 [dB] 정도, STTC_F에 비하여 약 2 [dB] 정도 부호 이득을 보여 주고 있다. Gong 등[9]은 Tarokh 등의 STTC 부호만을 비교대상으로 삼아 성능비교를 했지만, TCM 부호를 외부 부호로서 사용한 시스템의 성능이 STTC 부호의 성능보다 우수하다는 결과는 Gong 등의 결과와 일치한다.



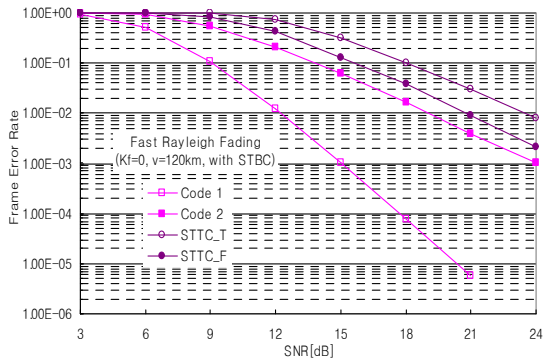
<그림 3> 빠른 레일리 페이딩 채널에서 STBC 와 결합된 TCM 혹은 MTCM 부호의 FER 성능.
<Fig. 3> FER performance of the TCM or MTCM codes with STBC on fast Rayleigh fading channels.

<그림 4>와 <그림 5>의 결과를 종합하면, STBC의 외부 부호로서 TCM 부호 혹은 MTCM 부호와 결합한 시스템의 FER 성능은 빠른 레일리 페이딩 채널에서 Tarokh 등의 STTC부호나 Firmanto 등의 STTC부호의 FER 성능보다 훨씬 우수하다고 말할 수 있다.

이와 같이 TCM 혹은 MTCM 부호를 외부 부호로



<그림 4> 빠른 레일리 페이딩 채널에서 STBC 와 결합된 MTCM 부호와 STTC 부호의 FER 비교.
<Fig. 4> FER comparison of the MTCM codes with STBC, and STTCs on fast Rayleigh fading channels.



<그림 5> 빠른 레일리 페이딩 채널에서 STBC 와 결합된 TCM 부호와 STTC 부호의 FER 비교.
<Fig. 5> FER comparison of the TCM codes with STBC, and STTCs on fast Rayleigh fading channels.

사용한 STBC 결합시스템의 FER 성능이 STTC부호의 성능보다 우수한 이유는, 2개의 송신 안테나를 사용하는 시스템에서 최대의 다이버시티 이득을 보이는 STBC의 장점과 대역 제한된 환경에서 최대의 부호 이득을 제공하는 TCM 및 MTCM 부호의 장점이 함께 나타났기 때문이다. 그러나 이러한 결합 시스템은 두가지 부호 방식을 동시에 사용해야 하므로 하드웨어 복잡도가 증가하는 단점이 생기게 되며, 송신 안테나 개수가 3 개 이상이 되면 STBC 부호의 특성상 추가적인 대역폭 확장이 불가피하게 되는 단

점이 생기게 된다.

V. 결 론

본 논문에서는 무선통신환경의 빠른 페이딩 채널에서 전송용량을 향상시키기 위한 시스템 모델로서 2개의 전송안테나와 1개의 수신안테나 구조를 갖는 STBC의 외부 부호로서 MTCM 부호를 사용하는 시스템 모델을 고려하였다. 공정한 성능 비교를 위하여 동일한 전송 전력, 동일한 대역폭 효율(throughput) 그리고 동일한 상태 수를 전제하고, 고려한 시스템과 STTC부호의 성능 비교를 실시하였다. FER 성능평가를 위한 모의실험 결과, 고려한 시스템은 빠른 레일리 페이딩 채널에서 비교대상인 Tarokh 등의 STTC부호와 Firmanto 등의 STTC부호 보다 성능이 우수한 것으로 나타났다.

주의할 점으로 이러한 성능 이득의 배경에는 하드웨어 복잡도와 FER 성능과의 상충관계(trade-off)가 존재하였다는 사실을 기억해야 한다. 즉, 결합 시스템은 두가지 부호 방식을 동시에 사용해야 하므로 하드웨어 복잡도가 증가하여 손해를 본 대신 FER 성능쪽에서 이득을 본 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Selected Areas of Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [2] B. Vucetic and J. Yuan, *Space-Time Coding*, Wiley, pp. 91-115, 2003.
- [3] V. Tarokh, N. Seshadri, A. R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 744-765, Mar. 1998.
- [4] W. Firmanto, B. S. Vucetic, and J. Yuan, "Space-time TCM with improved performance on fast fading channels," *IEEE Comm. Lett.*, vol. 5, no. 4, pp. 154-156, April. 2001.
- [5] C. Yang, Z. Zhou, W. Zou, and Y. Ye, "Special property of multiple Trellis Coded Modulation utilized for its decoding," *Proc. Int. Conf. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, pp. 1-4, Oct. 2008.
- [6] D. Divsalar and M. K. Simon, "The design of trellis coded MPSK for fading channels: set partitioning for optimum code design," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 36, no. 9, pp. 1013-1024, Sept. 1988.
- [7] G. Ungerboeck, "Channel coding with multilevel/phase signals," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 28, no. 1, pp. 55-67, Jan. 1982.
- [8] S. M. Alamouti, V. Tarokh, and P. Poon, "Trellis coded modulation and transmit diversity: Design criteria and performance evaluation," *Proc. IEEE ICUPC'98*, pp. 703-707, Oct. 1998.
- [9] Y. Gong and K. B. Letaief, "Concatenated space-time block coding with trellis coded modulation in fading channels," *IEEE Trans. Wireles. Commun.*, vol. 1, no. 4, pp. 580-590, Oct. 2002.
- [10] M. Uysal and C. N. Georghiadis, "Upper bounds in the BER performance of MTCM-STBC schemes over shadowed Rician fading channels," *Eurasip J. Applied Signal Processing, Special Issue on Advances in Smart Antennas*, vol. 2004, no. 9, pp. 1238-1245, July. 2004.
- [11] H. Shah, A. Hedayat, and A. Nosratinia, "Performance of concatenated channel codes and orthogonal space-time block codes," *IEEE Trans. Wireles. Commun.*, vol. 5, no. 6, pp. 1406-1414, June. 2006.
- [12] E. Biglieri, D. Divsalar, P. J. McLane, and M. K. Simon, *Introduction to Trellis-Coded Modulation with Applications*, Macmillan, pp. 411-412, 1991.
- [13] S. S. Periyalwar and S. M. Fleisher, "A modified design of trellis-coded MPSK for fading channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 41, no. 6, pp. 874-882, June. 1993.

저자소개



진 익 수 (Jin, Ik-Soo)

- 2001년 9월~현재 : 경남대학교 정보통신공학과 부교수
- 2000년 5월~2001년 12월 : 한국전자통신연구원 IMT-2000개발본부 초빙연구원
- 2000년 3월~2001년 8월 : 위덕대학교 정보통신공학과 전임강사
- 1995년 11월~2000년 2월 : 한국전자통신연구원 IMT-2000개발본부 선임연구원
- 1990년 9월~1995년 8월 : 연세대학교 본대학원 전기공학과 공학박사
- 1989년 8월~1990년 2월 : 군복무 (석사장교 13기)
- 1987년 3월~1989년 2월 : 연세대학교 본대학원 전기공학과 공학석사
- 1983년 3월~1987년 2월 : 연세대학교 전기공학과 공학사