

길쌈 부호화 시공간 블록 부호 시스템의 오류 성능에 대한 채널 변화 및 채널 추정 오류의 영향

윤은식¹, 김선형², 박상준³, 강병권^{2*}

¹(주)M&D, ²순천향대학교 정보통신공학과, ³원광대학교 정보통신공학과

Impact of Channel Variations and Channel Estimation Errors on the Error Performance of Convolutional Coded STBC Systems

Eunsik Yun¹, Sun-Hyung Kim², Sangjoon Park³, Byeong-Gwon Kang^{2*}

¹Dept. of Research Center, M&D Corporation

²Dept. of Information and Communication Engineering, Soonchunhyang University

³Dept. of Information and Communication Engineering, Wonkwang University

요약 논문에서는 길쌈 부호화 시공간 블록 부호 시스템의 오류 성능에 대한 채널 변화 및 채널 추정 오류의 영향에 대해 살펴보았다. 본 논문에서는 직교 방식의 Alamouti 시공간 블록 부호 및 준직교 방식의 Jafarkhani 시공간 블록 부호의 두 가지 시공간 블록 부호 방식을 고려하여, 길쌈 부호화 시공간 블록 부호 시스템들에서 채널 변화 및 추정 오류 정도에 따른 오류 성능 변화를 모의실험을 통해 분석하였다. 분석 결과 채널 변화 속도가 느린 경우에는 시간 다이버시티 효과로 인해 채널 변화가 없는 상황 대비 검출 방식에 관계없이 오류 성능이 향상되나, 채널 변화 속도가 빠른 경우에는 검출 과정에서의 오류로 인해 특히 준직교 Jafarkhani 적용 시스템에서 STBC 검출 사용 시 ZF 및 MMSE 검출 사용 시와 달리 큰 폭의 성능 열화가 발생함을 관측하였다. 또한 채널 추정 오류 증가 시에는 검출 기법 및 채널 변화 속도에 관계없이 큰 폭의 성능 열화가 발생함을 확인하였다.

주제어 : 시공간 블록 부호, 오류 성능, 채널 변화, 채널 추정 오류, 길쌈 부호

Abstract This paper investigates the impact of the channel variations and channel estimation errors on the error performance of convolutional coded STBC systems. We consider the orthogonal Alamouti STBC and the quasi-orthogonal Jafarkhani STBC, and the error performance of the convolutional coded STBC system is investigated according to the channel variation and channel estimation error via numerical simulations. Simulation results show that, if the channel variation speed is slow, time diversity effects improve the error performance compared to the static-channel cases. However, if the channel variation speed is fast, unlike ZF or MMSE detection, the conventional STBC detection has the significant performance degradation especially with the quasi-orthogonal Jafarkhani STBC. Further, the error performance of the system is significantly degraded as the channel estimation errors become stronger, regardless of the detection scheme and channel variation speed.

Key Words : STBC, Error Performance, Channel Variations, Estimation Errors, Convolutional Code

*This research was supported by the Soonchunhyang University Research Fund.

*Corresponding Author : Byeong-Gwon Kang (bgkang@sch.ac.kr)

Received March 8, 2018

Revised April 27, 2018

Accepted May 20, 2018

Published May 28, 2018

1. 서론

급속도로 발전하고 있는 이동 통신 시장에서는 무선 채널 환경에서 데이터 및 멀티미디어 등 다양한 서비스 및 기술들을 요구하고 있다[1-19]. 이러한 서비스를 제공하기 위해 무선 통신 시스템에서는 데이터의 고속 송수신과 신뢰성 향상을 위한 다양한 기술들을 사용하고 있다. 시공간 블록 부호 (Space-Time Block Code, STBC) 기술은 무선 채널 환경에서 다이버시티 이득과 부호화 이득을 동시에 얻을 수 있는 기법이다[1-5]. 시공간 블록 부호기술은 수신 심볼들 간 단순 선형 결합을 통해 송신 심볼들을 검출할 수 있는 기법으로 한정된 주파수 자원 및 송신전력을 효율적으로 이용할 수 있다는 특징을 지닌다. 하지만 이러한 단순 선형 결합을 통한 송신 심볼의 검출은 페이딩 채널환경에서 인접한 심볼을 전송하는 동안 채널 특성이 변하지 않는다는 가정 하에 이루어지며, 이에 따라 시변 채널 등 채널이 변화하는 상황에서는 오류 성능의 저하가 발생할 수 있다[6-8]. 특히, 채널의 변화가 이루어지는 동시에 수신단 채널 추정 정보에 오류가 존재하는 상황에서는 이러한 시공간 블록 부호의 검출 성능 열화가 더욱 심화될 수 있으며, 이에 따라 채널 변화 및 채널 추정 오류가 존재하는 상황에서의 시공간 블록 부호의 오류 성능에 대한 연구들이 기 진행된 바 있다[6-10]. 하지만, 무선 통신 채널에서는 채널의 특성상 빈번한 오류가 발생하며, 이러한 채널의 특성을 극복하고 충분한 신뢰도를 확보하기 위해서 상용 무선 통신 시스템에서는 시공간 블록 부호 이외에도 오류 정정 부호가 널리 사용되고 있다[11-13]. 따라서 기존 연구들과 달리 오류 정정 부호 및 시공간 블록 부호가 동시에 고려된 시스템에서 채널 변화 및 채널 추정 오류에 따른 오류 성능 변화에 대해 살펴볼 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 대표적인 오류 정정 부호의 하나인 길쌈 부호 (Convolutional Code)가 적용된 길쌈 부호화 시공간 블록 부호 시스템의 오류 성능에 대한 채널 변화 및 채널 추정 오류의 영향에 대해 살펴본다. 본 논문에서는 먼저 시공간 블록 부호 방식으로 직교 방식의 Alamouti 시공간 블록 부호 및 준직교 방식의 Jafarkhani 시공간 블록 부호의 두 가지 방식을 고려한다[1,2]. 또한 시공간 블록 부호에 대한 검출 기법으로는 수신 심볼들 간의 선형 결합 방식과 함께 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 널리 사용되는 선형 ZF

(Zero-Forcing) 및 MMSE (Minimum-Mean-Square Error) 기법의 적용을 고려하였다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 길쌈 부호화 시공간 블록 부호 시스템들에서 각 시공간 블록 부호 및 검출 기술들이 적용된 경우의 오류 성능 변화를 관찰하여, 오류 성능에 대한 채널 변화 및 채널 추정 오류의 영향을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 길쌈 부호화 시공간 블록 부호 시스템 모델을 정의한다. 3장에서는 본 논문에서 고려하는 시공간 블록 부호 및 검출 기술들에 대해 자세하게 기술한다. 4장에서는 모의실험을 통해 채널 변화 및 채널 추정 오류 정도에 따른 길쌈 부호화 시공간 블록 부호 시스템의 오류 성능을 관찰한다. 마지막으로 5장에서는 결론에 대해 기술하고 본 연구가 갖는 한계점 및 향후 연구 방향에 대해서 기술한다.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 송신단 안테나 수가 M 이며 수신단 안테나 수가 1개인 MISO (Multiple-Input Single-Output) 시스템을 고려하며, 이 때 송신단에서는 매 전송 시간마다 M 개의 심볼이 동시에 전송된다. Fig. 1은 시스템의 송신단 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 특정 데이터 블록에 대한 K 개의 데이터 비트열은 길쌈 부호 부호기를 거쳐 N 개의 부호어 비트열로 부호화되며, 해당 비트열은 변조기를 거쳐 J 개의 심볼들 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_J]^T$ 로 변조된다. 변조 과정 이후에는 M 개의 심볼 단위로 시공간 블록 부호의 부호화 과정을 진행하게 되며, 이러한 시공간 블록 부호 부호화 과정 이후에는 총 $G = J/M$ 개의 시공간 블록 부호어가 생성된다. g ($1 \leq g \leq G$) 번째 시공간 블록 부호 부호기의 입력 심볼 벡터인 $\mathbf{x}_g = [x_{(g-1)M+1}, \dots, x_{gM}]^T$ 에 대해 시공간 블록 부호 부호기는 총 M 개의 심볼 벡터들을 생성하여 출력한다. 이 때 직교 방식의 Alamouti 시공간 블록 부호 ($M=2$)를 적용할 경우 출력 벡터들의 집합 $\mathbf{S}_g = [\mathbf{s}_{2g-1} \mathbf{s}_{2g}]$ 는 다음과 같이 나타난다[1].

$$\mathbf{S}_g = \begin{bmatrix} x_{2g-1} & x_{2g} \\ -x_{2g}^* & x_{2g-1}^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

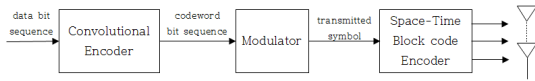


Fig. 1. Transmitter Block Diagram

또한, 준직교 방식의 Jafarkhani 시공간 블록 부호 ($M=4$)를 적용할 경우 시공간 블록 부호 부호기의 출력 벡터들의 집합 $\mathbf{S}_g = [\mathbf{s}_{4g-3} \mathbf{s}_{4g-2} \mathbf{s}_{4g-1} \mathbf{s}_{4g}]$ 은 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{S}_g = \begin{bmatrix} x_{4g-3} & x_{4g-2} & x_{4g-1} & x_{4g} \\ -x_{4g-2}^* & x_{4g-3}^* & -x_{4g}^* & x_{4g-1}^* \\ -x_{4g-1}^* & -x_{4g}^* & x_{4g-3}^* & x_{4g-2}^* \\ x_{4g} & -x_{4g-1} & -x_{4g-2} & x_{4g-3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

따라서 특정 데이터 블록을 위해 시공간 블록 부호 부호기에서 생성된 출력 벡터의 총 수는 J 이다. 이 때 j 번째 출력 벡터 $\mathbf{s}_j (1 \leq j \leq J)$ 에 대한 시스템의 입출력 관계식은 다음과 같다.

$$\mathbf{r}_j = \mathbf{h}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_j \quad (3)$$

여기서 \mathbf{r}_j 는 수신 심벌을 나타내며, \mathbf{n}_j 는 잡음 성분으로 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 i.i.d. 순환 대칭 복소 가우시안 확률 변수이다. \mathbf{h}_j 는 $1 \times M$ 레일리 채널 벡터로 시간에 따른 변화가 발생한다. 이 때 인접한 두 채널 벡터간 시간에 따른 변화 정도는 상관 계수 (Correlation Coefficient) c 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{h}_{j+1} = \sqrt{c} \mathbf{h}_j + \sqrt{1-c} \mathbf{a}_{j+1} \quad (4)$$

식 (4)에서 \mathbf{a}_{j+1} 은 $1 \times M$ 레일리 벡터로 $(j+1)$ 번째 시간에서의 채널의 변화에 기여한다. 예를 들어, $c=1$ 인 경우 \mathbf{a}_{j+1} 와 관계없이 시간에 따른 채널 변화는 존재하지 않으며, $c=0$ 인 경우 \mathbf{h}_{j+1} 은 이전 시간에서의 채널 벡터 \mathbf{h}_j 와 관계없이 새로운 레일리 성분인 \mathbf{a}_{j+1} 에 의해서만 결정된다.

3. 시공간 블록부호 검출 기술

가장 기본적으로 시공간 블록 부호에 대해 적용할 수 있는 검출 기술로는 \mathbf{S}_g 에 포함된 시공간 블록 부호 부호기의 출력 벡터들이 겪는 채널이 변하지 않는 환경, 즉 $\mathbf{h}_{(g-1)M+1} = \mathbf{h}_{(g-1)M+2} = \dots = \mathbf{h}_{gM}$ 인 상황을 고려하는 단순 선형 결합 방식이 있다[1,2]. 단순 선형 결합 방식은 선형 곱셈 및 덧셈 연산만을 통해 시공간 부호의 입력 심벌 벡터인 $\mathbf{x}_g = [x_{(g-1)M+1}, \dots, x_{gM}]^T$ 를 추정하는 기술로, 매우 낮은 연산량을 지님과 동시에 채널이 변하지 않는 경우, 즉 $c=0$ 인 경우에는 최대 공간 다이버시티 (Space Diversity) 이득을 얻는 것으로 알려져 있다. 하지만, 채널 변화 및 채널 추정 오류가 존재하는 경우 단순 선형 결합 방식을 위해 적용되었던 가정이 맞지 않게 되고 이에 따라 단순 선형 결합 방식은 심각한 오류 성능 저하 현상을 겪을 수 있다. 구체적인 단순 선형 결합 방식의 적용 방법은 기존 문헌에 널리 알려져 있으므로 본문에서는 서술의 편의상 이를 생략한다.

다음으로, 본 논문에서는 선형 ZF 및 MMSE 기법을 이용한 시공간 블록 부호의 검출 방식에 대해 살펴본다. 선형 ZF 및 MMSE 기법은 송수신단에 복수의 안테나를 가지는 MIMO 시스템의 검출 기법으로 잘 알려져 있다. 이러한 MIMO 시스템에서의 선형 ZF 및 MMSE 기법을 시공간 블록 부호 MISO 시스템에 적용하기 위해서는 시공간 블록 부호기를 거친 출력 벡터들에 대해 MIMO 시스템과 유사한 행렬 형태의 유효 입출력 관계식을 구할 필요가 있다. 유효 입출력 관계식은 각각의 시공간 블록 부호 부호화 과정을 거친 M 개의 출력 벡터와 해당 수신 심벌 및 채널 벡터들을 결합하여 형성될 수 있다. 구체적으로, g 번째 시공간 블록 부호 과정을 거친 \mathbf{S}_g 에 대한 유효 입출력 관계식은 다음과 같이 나타난다[1-4].

$$\mathbf{y}_g = \mathbf{H}_g \mathbf{x}_g + \mathbf{n}_g \quad (5)$$

식 (5)에서 \mathbf{n}_g 는 $M \times 1$ 유효 잡음 벡터이며 \mathbf{y}_g 는 $M \times 1$ 유효 수신 신호 벡터이다. 이 때 \mathbf{y}_g 는 Alamouti 시공간 블록 부호 및 Jafarkhani 시공간 블록 부호 방식에 대해서 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{y}_g = [r_{2g-1} \ r_{2g}^*]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_g = [r_{4g-3} \ r_{4g-2}^* \ r_{4g-1}^* \ r_{4g}]^T \quad (7)$$

한편, \mathbf{H}_g 는 $M \times M$ 채널 행렬로 Alamouti 시공간 블록 부호 및 Jafarkhani 시공간 블록 부호 방식에 대해서 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{H}_g = \begin{bmatrix} h_{2g-1,1} & h_{2g-1,2} \\ h_{2g,2}^* & -h_{2g,1}^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{H}_g = \begin{bmatrix} h_{4g-3,1} & h_{4g-3,2} & h_{4g-3,3} & h_{4g-3,4} \\ h_{4g-2,2}^* & -h_{4g-2,1}^* & h_{4g-2,4}^* & -h_{4g-2,3}^* \\ h_{4g-1,3}^* & h_{4g-1,4}^* & -h_{4g-1,1}^* & -h_{4g-1,2}^* \\ h_{4g,4} & -h_{4g,3} & -h_{4g,2} & h_{4g,1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

이 때 $h_{j,m}$ 은 \mathbf{h}_j 의 m 번째 원소 성분을 나타낸다.

상기의 유효 입출력 관계식에 이용하여, 선형 ZF 및 MMSE 검출기를 거친 송신 심벌들의 추정치들은 각각 유효 채널 행렬에 대한 의사 역행렬 및 MMSE 필터 행렬을 유효 수신 신호 벡터에 곱하는 방식을 통해 다음과 같이 구할 수 있다[4].

$$\hat{\mathbf{x}}_{ZF} = (\mathbf{H}_g^H \mathbf{H}_g)^{-1} \mathbf{H}_g^H \mathbf{y}_g \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{MMSE} = (\mathbf{H}_g^H \mathbf{H}_g + \sigma_n^2 \mathbf{I}_M)^{-1} \mathbf{H}_g^H \mathbf{y}_g \quad (11)$$

식 (11)에서 \mathbf{I}_M 은 $M \times M$ 단위 행렬(Identity Matrix)을 나타낸다.

이렇게 식 (9) 및 (10)과 같이 각각의 시공간 블록 부호의 출력 부호 벡터들이 겪는 모든 채널 응답 및 수신 신호들을 고려하여 선형 MMSE 및 ZF 검출기를 적용하는 경우, 시공간 블록 부호를 위한 기본적인 검출 방식인 단순 선형 결합 방식에 대비하여 채널 변화 및 채널 추정 오류에 의한 오류 성능의 변화 정도가 다르게 나타날 수 있다. 이에 대한 상세한 결과는 다음 장의 모의실험 결과를 통해 살펴보도록 한다.

4. 모의실험 결과

본 장에서는 길쌈 부호화 시공간 블록 부호 시스템의 채널 추정 및 채널 오류 정도에 따른 평균 비트 오류(Bit Error Rate, BER)을 모의실험을 통해 산출한다. 변조방식으로는 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조 방식을 고려하였으며, 시스템 환경변수로 $K=288$, $N=576$, $J=288$ 을 고려하였다. 길쌈 부호는 구속장의

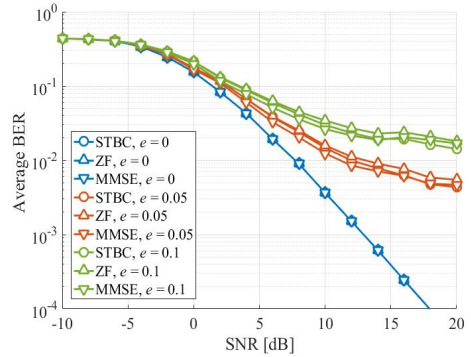


Fig. 2. Average BERs of Convolutional Coded Alamouti STBC Systems when $c = 1$

길이 (Constraint Length)가 7인 $(171,133)_8$ 부호를 고려하였으며, 수신단에서는 시공간 블록 부호에 대한 검출 과정이 진행된 이후 복호 깊이 (Traceback Depth)가 35인 경관정 비터비 복호기 (Viterbi Decoder)를 이용한 복호 과정을 진행하였다[14,15]. 본 장에서는 채널 추정 오류의 정도를 e 로 표기하였으며, 이 때 e 는 실제 채널 응답 및 추정된 채널 간 오류의 분산을 나타낸다. 또한, 서술의 편의상 시공간 블록 부호의 단순 선형 결합 방식을 STBC 검출로 표현한다.

Fig. 2는 직교 Alamouti 시공간 블록 부호가 적용된 시스템에서 $c=1$ 인 경우, 즉 채널 변화가 존재하지 않는 경우 각 기법들의 BER 성능을 나타내고 있다. $e=0$, 즉 채널 추정 오류가 존재하지 않는 경우 STBC, ZF, MMSE 검출 모두 동일한 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 하지만, 채널 추정 오류가 증가함에 따라 각 기법들의 BER이 점차적으로 높아지게 되며, 또한 ZF 및 MMSE 검출을 사용할 경우 STBC 검출과 대비하여 상대적으로 열화된 BER 성능을 얻는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 3은 직교 Alamouti 시공간 블록 부호가 적용된 시스템에서 $c=0.99$ 인 경우, 즉 느린 채널 변화가 존재하는 경우 각 기법들의 BER 성능을 나타내고 있다. 채널 변화가 발생함에 따라 채널이 변화하지 않는 상황을 가정하는 STBC 검출의 성능이 e 에 관계없이 ZF 및 MMSE 검출과 유사한 성능을 달성함을 관찰할 수 있다. 한편, Fig. 2와 비교할 때 각 기법들의 성능이 점차적으로 향상됨을 관찰할 수 있는데, 이는 채널 변화에 의해 전송된 데이터 블록에 대한 비터비 복호 과정에서 시간 다이버시티 (Time Diversity) 이득을 얻을 수 있기 때문이다.

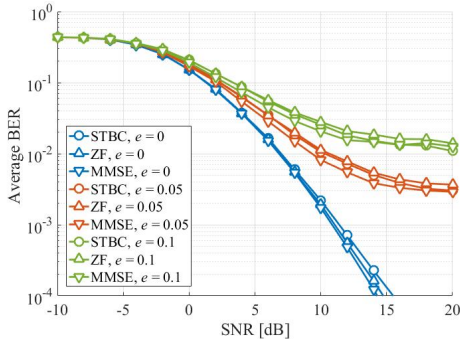


Fig. 3. Average BERs of Convolutional Coded Alamouti STBC Systems when $c = 0.99$

Fig. 4는 직교 Alamouti 시공간 블록 부호가 적용된 시스템에서 $c = 0.9$ 인 경우, 즉 빠른 채널 변화가 존재하는 경우 각 기법들의 BER 성능을 나타내고 있다. 빠른 채널 변화로 인해 시공간 블록 부호의 직교성이 크게 훼손되며, 이로 인해 시불변 채널을 가정하는 STBC 검출의 성능이 채널 추정 오류 e 에 관계없이 ZF 및 MMSE 검출 대비 크게 열화되는 것을 관찰할 수 있다. 한편, ZF 및 MMSE 검출기의 경우 채널 추정 오류가 큰 상황 ($e = 0.1$)에서는 이로 인한 신호 왜곡으로 인해 Fig. 3의 경우와 유사한 BER 성능을 달성하나, 채널 추정 오류가 크지 않은 상황($e = 0, e = 0.05$)에서는 추가적인 시간 다이버시티 효과로 인해 Fig. 3의 경우보다 더욱 우수한 BER 성능을 달성함을 확인할 수 있다.

다음으로, Fig. 5에서는 준직교 Jafarkhani 시공간 블록 부호가 적용된 시스템에서 $c = 1$ 인 경우, 즉 채널 변화가 존재하지 않는 경우 각 기법들의 BER 성능을 나타내고 있다. Fig. 2의 결과와 달리 채널 추정 오류가 존재하지 않는 경우 ($e = 0$) STBC 검출 및 MMSE 검출이

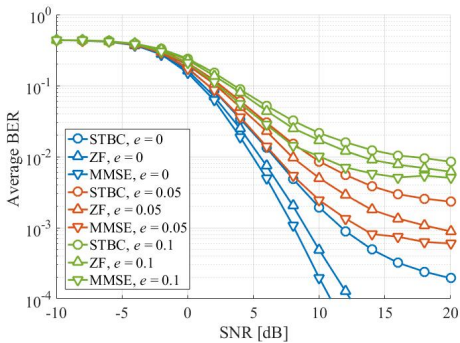


Fig. 4. Average BERs of Convolutional Coded Alamouti STBC Systems when $c = 0.9$

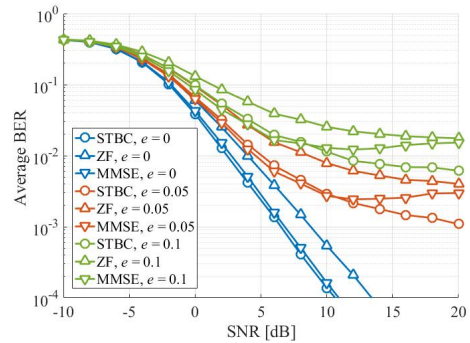


Fig. 5. Average BERs of Convolutional Coded Jafarkhani STBC Systems when $c = 1$

ZF 검출 대비 보다 우수한 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 이는 준직교 부호의 특성으로 인해 발생하는 간섭 성분이 ZF 검출 기법 적용 시에는 추가적인 잡음 성분으로 작용하기 때문이다. 한편, 채널 추정 오류가 증가하는 경우에는 Fig. 2의 경우와 유사하게 각 기법들의 BER이 점차적으로 높아지게 되며, 또한 STBC 검출이 ZF 및 MMSE 검출 대비 상대적으로 우수한 BER 성능을 달성함을 관찰할 수 있다.

Fig. 6에서는 준직교 Jafarkhani 시공간 블록 부호가 적용된 시스템에서 $c = 0.99$ 인 경우, 즉 느린 채널 변화가 존재하는 경우 각 기법들의 BER 성능을 나타내고 있다. Fig. 2 및 Fig. 3의 경우와 유사하게, Fig. 5의 경우와 비교할 때 시간 다이버시티 이득으로 인해 각 기법들의 성능이 점차적으로 향상된 것을 관찰할 수 있다. 또한, 전반적으로 채널 추정 오류에 관계없이 STBC, ZF, MMSE 검출 기법들이 유사한 성능을 달성함을 관찰할 수 있다.

마지막으로, Fig. 7에서는 준직교 Jafarkhani 시공간 블록 부호가 적용된 시스템에서 $c = 0.9$ 인 경우, 즉 빠른

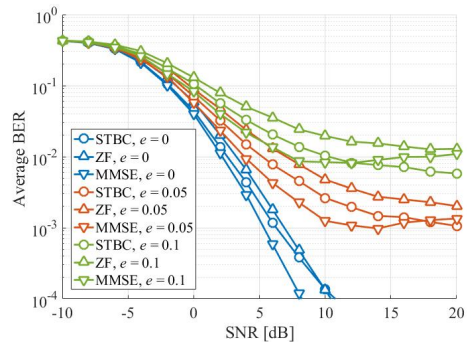


Fig. 6. Average BERs of Convolutional Coded Jafarkhani STBC Systems when $c = 0.99$

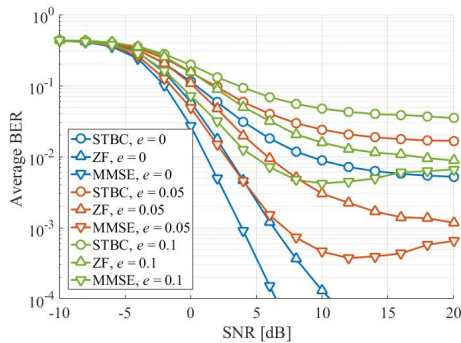


Fig. 7. Average BERs of Convolutional Coded Jafarkhani STBC Systems when $c = 0.9$

채널 변화가 존재하는 경우 각 기법들의 BER 성능을 나타내고 있다. 빠른 채널 변화로 인해 시불변 채널을 가정하는 STBC 검출의 성능이 크게 열화되며, 특히 Fig. 4의 직교 Alamouti 시공간 블록 부호 대비 그 열화 정도가 크게 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 준직교 특성으로 인해 기본적으로 존재하는 간섭 성분에 의한 성능 열화가 급격한 채널 변화에 의해 크게 증가하는 것을 나타내며, 따라서 채널 추정 오류가 존재하지 않는 상황에서의 STBC 검출 기법의 성능이 채널 추정 오류가 존재하는 상황에서의 ZF 및 MMSE 성능보다도 열화될 수 있음을 확인할 수 있다. 한편, 채널 추정 오류가 존재하지 않는 상황에서 ZF 및 MMSE 기법은 시간 다이버시티 이득의 증가로 인해 Fig. 5 및 Fig. 6의 경우 대비 보다 향상된 성능을 달성하며, 특히 MMSE 기법에서 보다 명확한 성능 이득이 관찰됨을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 길쌈 부호화 시공간 블록 부호 시스템의 오류 성능에 대한 채널 변화 및 채널 추정 오류의 영향에 대해 살펴보았다. 모의실험 결과 채널 변화의 속도가 느린 경우에는 기존의 시공간 블록 부호 검출에 사용되는 STBC 검출 방식을 사용하여도 길쌈 부호의 적용에 의한 시간 다이버시티 효과로 인해 채널 변화가 존재하지 않는 상황 대비 오류 성능 향상이 가능함을 확인하였다. 이는 ZF 및 MMSE 검출 방식을 적용한 경우에도 모두 확인되었다. 다만 채널 변화의 속도가 빠른 경우에는 검출 과정에서 발생하는 오류로 인해 STBC 검출의 경우

큰 폭의 큰 폭의 성능 열화가 발생함을 관측하였으며, 이러한 성능 열화 정도는 특히 준직교 Jafarkhani 시공간 블록 부호 사용 시 더욱 확대됨이 관측되었다. 하지만 ZF 및 MMSE 검출 시에는 추가적인 시간 다이버시티로 인해 성능이 더욱 향상될 수 있음을 확인하였다. 이러한 성능 경향은 채널 추정 오류가 존재하지 않거나 크지 않을 때 관측되었으며, 큰 채널 추정 오류가 존재하는 상황에서는 검출 기법 및 채널 변화의 속도에 관계없이 큰 폭의 성능 열화가 발생함을 확인하였다.

본 논문에서는 기존의 STBC 검출을 대신할 수 있는 저복잡도 MIMO 검출 기법인 ZF 및 MMSE 검출 기술을 고려하였으며, 향후 간섭 제거 기술 및 반복 검출 기술 등 고복잡도 준최적 검출 기술 활용 시 채널 변화 및 채널 추정 오류에 의한 영향을 살펴볼 필요가 있다. 또한, 길쌈 부호 대신 터보 부호 등 반복 부호를 사용하는 시공간 블록 부호 시스템의 오류 성능 또한 분석이 필요하다. 이러한 주제들은 향후 연구 과제로 남는다.

REFERENCES

- [1] S. M. Alamouti. (1998). A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE J. Select. Areas Commun.* 16(8), 1451-1458.
- [2] H. Jafarkhani. (2001). A quasi-orthogonal space-time block code. *IEEE Trans. on Commun.* 49(1), 1-4.
- [3] H. Jafarkhani. (2005). *Space-Time Coding: Theory and Practice*. Cambridge. Cambridge University Press.
- [4] Y. Cho, J. Kim, W. Yang & C. Kang. (2011). *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. New York. Wiley-IEEE Press.
- [5] S. Chern, W. Huang & H. Liu. (2016). The effects of mutual coupling for the space-time block coded MIMO-OFDM systems. *Proc. ISAPCS 2016*. 1-6.
- [6] J. Wu & G. J. Saulnier. (2007). Orthogonal space-time block code over time-varying flat-fading channels: channel estimation, detection, and performance analysis. *IEEE Trans. on Commun.* 55(5), 1077-1087.
- [7] K. Fang & G. Leus. (2009). Space-time block coding for frequency-selective and time-varying channels, *Proc. ASILOMAR*. 625-629.
- [8] F. C. Zheng & A. G. Burr. (2005). Signal detection for orthogonal space-time block coding over time-selective fading channels: a PIC approach for the Gi systems. *IEEE Trans. on Commun.* 53(6), 969-972.

[9] Y. Whang & H. Park. (2008). An adaptive space-time receiver for time-varying channel with imperfect channel estimation. *Proc. IEEE WCNC 2008*. 1-5.

[10] M. Norouzi, E. Attang, Y. Wu, R. B. Ellis & G. E. Atkin. (2015). Impact of channel estimation errors on the performance of space time code. *Proc. IEEE EIT 2015*, 587-591.

[11] ITU-R Rec. M. 1225. (1997). *Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000*.

[12] IEEE 802.16. (2006). *IEEE Standard for local and metropolitan area networks - part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*.

[13] 3GPP 36.212. (2010), *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and Channel Coding*.

[14] P. Sweeney. (2002). *Error Control Coding: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons.

[15] T. K. Moon. (2005). *Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms*. New York. John Wiley & Sons.

[16] J. Lee. (2015) Convergent case study of research and education: internet of things based wireless device forming research. *Journal of the Korea Convergence Society*. 6(4), 1-7.

[17] K. Kim & S. Yun. (2016) A study on BER performance improvement by using adaptive FEC schemes in visible light communication. *Journal of Convergence for Information Technology*. 6(4), 99-106.

[18] S. Hong. (2017) Research on IoT international strategic standard model. *Journal of the Korea Convergence Society*. 8(2), 21-26.

[19] J. Kim, J. Cho, D. Cho & D. Son. (2017) A study on radio interference analysis for wireless LAN. *Journal of Convergence for Information Technology*. 7(5), 117-122.

윤 은 식(Yun, Eun Sik) [정회원]



- 2015년 2월 : 순천향대학교 정보통신공학과(공학사)
- 2017년 2월 : 순천향대학교 정보통신공학과(공학석사)
- 2016년 12월 ~ 현재 : (주)M&D 연구원

▪ 관심분야 : MIMO 시스템, 근거리 무선통신, 이동통신
 ▪ E-Mail : bulbob00@nate.com

김 선 형(Kim, Sun Hyung) [정회원]



- 1988년 2월 : 성균관대학교 전자공학학과(공학박사)
- 1989년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 교수
- 2006년 3월 ~ 현재 : (사)한국대학발명협회 부회장

▪ 관심분야 : 데이터통신, 임베디드시스템, 사물인터넷 등
 ▪ E-Mail : shkim@sch.ac.kr

박 상 준(Park, Sang Joon) [정회원]



- 2011년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과(공학박사)
- 2011년 8월 ~ 2014년 2월 : LG전자 VC사업본부(선임연구원)
- 2014년 4월 ~ 2016년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과(연구교수)

▪ 2016년 9월 ~ 현재 : 원광대학교 정보통신공학과 조교수
 ▪ 관심분야 : 통신 신호처리, 오류 정정부호, 텔레매틱스 등
 ▪ E-Mail : sjpark24@wku.ac.kr

강 병 권(Kang, Byeong Gwon) [정회원]



- 1993년 2월 : 연세대학교 전기공학과(공학박사)
- 1993년 3월 ~ 1997년 8월: 한국전자통신연구원 이동통신기술연구단(선임연구원)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 교수

▪ 관심분야 : RFID, 근거리 무선통신, CDMA 이동통신
 ▪ E-Mail : bgkang@sch.ac.kr