

다중경로 전송 채널 특성에 강건한 적응 MIMO-OFDM 시스템

정회원 김 현 동*, 종신회원 최 상 호**

A Robust Adaptive MIMO-OFDM System Over Multipath Transmission Channels

Hyun-dong Kim* *Regular Member*, Sangho Choe** *Lifelong Member*

요 약

적응 전송 MIMO(multiple input multiple output)-OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 시스템은 CSI(channel state information)의 피드백을 이용하여 각 부반송파의 채널 상황에 따라 변조 방식을 다르게 전송하는 시스템이다. CSI 피드백 채널인 상향링크 채널에는 송수신기 처리지연, 전송 지연, 프레임 지연 등 다중 지연 요소가 존재한다. 이러한 다중 지연요소로 인한 CSI 불일치는 채널 상황에 따라 적절한 변조 방식을 결정하는데 오류를 발생시키게 되어 시스템 성능을 떨어트린다. 본 논문에서는 적응 시스템에 내장되는 다중 지연 채널 예측 방식인 CTSBP(comb type samples based prediction)와 BTSBP(block type samples based prediction)에 대해 전송 지연 및 채널 신호 대 잡음비에 따른 MSE (mean square error), 데이터 율 등 성능을 비교한다. 이를 통하여 약조건 다중경로 채널환경에 강건한 적응 전송 SISO(single input single output)-OFDM / MIMO-OFDM을 설계한다. 또한 CSI 피드백 오버헤드를 줄이기 위한 방안으로 선형보간 방법을 제안하고 선형 보간 간격에 따른 MSE를 도출한다.

Key Words : Adaptive MIMO-OFDM, CSI, Multi-Step Prediction, Linear Interpolation

ABSTRACT

Adaptive MIMO-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system adaptively changes modulation scheme depending on feedback channel state information (CSI). The CSI feedback channel which is the reverse link channel has multiple symbol delays including propagation delay, processing delay, frame delay, etc. The unreliable CSI due to feedback delay degrades adaptive modulation system performance. This paper compares the MSE and data capacity with respect to delay and channel signal to noise ratio for the two multi-step channel prediction schemes, CTSBP and BTSBP, such that robust adaptive SISO-OFDM/MIMO-OFDM is designed over severe mobile multipath channel conditions. This paper presents an interpolation method to reduce feedback overhead for adaptive MIMO-OFDM and shows MSE with respect to interpolation interval.

I. 서 론

다중경로 페이딩 채널 하에서 MIMO-OFDM 시

스템의 부반송파들은 각각 다른 채널 값을 갖는다. 그러므로 좋은 채널 조건을 갖는 부반송파로는 데이터 전송속도를 높여주고, 나쁜 채널 조건을 갖는

* 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업 (ITA-2006-(C1090-0602-0011))과 2007년도 가톨릭대학교 교비연구비 지원의 연구결과로 수행되었음.

* 삼성전자 통신연구소, ** 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 (schoe@catholic.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-11-516, 접수일자 : 2006년 11월 29일, 최종논문접수일자 : 2007년 6월 25일

부반송파로는 데이터 전송속도를 낮추어주는 적응 전송 기법을 사용하면 시스템의 데이터 전송률을 더욱 더 높일 수 있다¹²⁾. 시스템이 적응적으로 전송하기 위해서는 단말기에서 매 프레임 또는 매 심볼마다 각 부반송파에 대한 CSI를 생성하여 기지국으로 전송해야 한다. 그러나 CSI 되먹임 구간에는 전송 지연을 비롯한 지연요소가 존재한다. 이 때문에 CSI 지연에 따른 시스템의 성능저하가 발생하게 된다.

이와 같은 CSI 전송지연에 따른 시스템의 성능 저하를 방지하기 위해 단일 심볼 지연을 보상하는 MMSE(minimum mean square error) 예측기를 적용한 적응전송 시스템이 제안되었지만³⁾ 심볼 전송 지연, 송수신단의 처리지연, 프레임 단위 전송에 따른 프레임 지연 등 되먹임 구간의 많은 지연 요소를 보상하기에는 부족하다. 이러한 되먹임 구간의 많은 지연 요소를 보상하기 위해 다중 스텝 채널 예측기가 제안되었다⁴⁾. 하지만 기존의 다중 스텝 채널 예측기는 MMSE를 기반으로 구성되어있어 특별히 MIMO-OFDM의 경우 계산량이 많아 시변 채널인 이동통신 채널 환경에 직접 적용하기에는 무리가 있다.

이 때문에 구현이 간단하고 다양한 채널 환경에 적용하기 용이한 최소 제곱법(least squares : LS)을 이용한 BTSBP(block type samples based prediction)¹⁵⁾ 채널 예측기가 제안되었다. 하지만 가중치 벡터 생성의 구조적인 원인인 제한된 입력 샘플 범위에 대한 공분산 행렬로 인해 채널의 지연이 증가 할수록 예측성능이 떨어지는 단점을 보인다. 이를 보완한 CTSBP(Comb Type Samples Based Prediction)¹⁶⁾가 기존의 BTSBP에 비해 샘플범위의 확대로 예측 MSE가 상대적으로 작음을 보여주었다.

본 논문에서는 채널 예측기의 성능의 비교분석을 통해 CTSBP가 다중 스텝 지연과 채널 추정 에러를 갖는 불완전 CSI에 강건함을 보여주며 결과로써 약조건 채널 환경에 생존성이 우수한 적응 전송 MIMO-OFDM 시스템을 설계한다. 또한 모의실험을 통해 채널 추정 신호 대 잡음비에 따른 예측 성능 및 적응 전송 MIMO-OFDM 시스템의 데이터 윌 변화량을 분석한다. 또한 채널 예측 값으로 인한 되먹임 오버헤드를 감소시키기 위한 보간 방법을 제안하고 보간 간격에 따른 채널 추정 오류에 대해 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 다중 지연 보상을 위한 채널 예측방법으로 BTSBP와

CTSBP의 예측 방법 및 두 예측 방법의 차이점을 설명한다. III장에서는 채널 예측방법을 MIMO-OFDM 시스템 및 프레임 단위 처리 시스템에 적용하는 방법, IV장에서는 채널 예측 시스템의 단점인 되먹임 오버헤드 감소방안을 제안하며 V장에서는 본 논문에서 제안한 MIMO-OFDM 시스템을 CSI 전송 지연 및 채널 신호 대 잡음비에 따른 MSE와 데이터 윌을 바탕으로 비교 분석하고 VI장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 다중 지연 보상을 위한 채널 예측 방법

적응 전송 시스템의 CSI 되먹임 지연으로 인한 시스템 성능 저하를 방지하기 위해서는 수신단에서 추정된 채널들을 바탕으로 지연을 고려한 채널 예측을 수행한 후 예측된 채널 정보를 송신측에 보내야 한다. 본 장에서는 되먹임 지연으로 인한 시스템 성능 저하를 방지하기 위한 기법인 채널 예측 방법과 송신 및 수신 처리 지연, 전송 지연 등 다중 지연 요소를 감안한 다중 스텝 채널 예측 방법 중 BTSBP와 CTSBP의 분석과 성능 비교 및 프레임 단위 시스템의 채널 예측 방식을 제안한다.

2.1. BTSBP 채널 예측 방법

BTSBP 채널 예측 방법은 그림 1과 같이 필터 탭수 M 에 해당하는 연속적인 채널 입력을 바탕으로 식 (1)과 같은 과정을 통해 p 스텝 후의 채널을 예측한다.

$$\hat{H}_{i+p} = \sum_{j=1}^M w_j H_{i-(j-1)} \quad (1)$$

여기서 H_i 는 i 시간의 채널 값, M 은 예측 필터의 탭수, p 는 예측기의 스텝, w_j 는 BTSBP 예측필터의

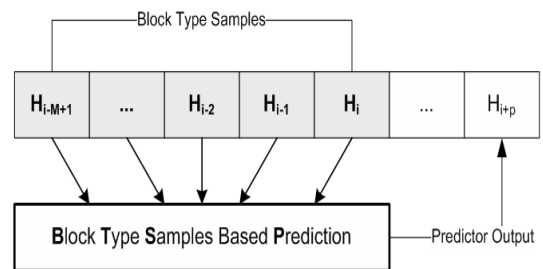


그림 1. BTSBP 채널 예측 방식

가중치이며 \hat{H}_{i+p} 는 예측된 채널 값을 나타낸다. BTSBP의 가중치는 식(2)의 과정으로부터 얻을 수 있다.

$$w = \Phi^{-1}z \quad (2)$$

식 (2)에서 Φ 는 N 개의 채널 입력으로부터 얻은 공분산행렬[5]의 상관행렬이며, z 는 공분산행렬과 벡터 $[H_{i+p} H_{i+p-1} H_{i+p-2} \dots H_{i+p-M+1}]$ 의 상호상관 행렬이다.

그러나 BTSBP는 가중치 벡터를 만드는 입력 데이터의 범위(span)가 작기 때문에 CSI지연이 증가할수록 MSE가 증가하여 예측 성능이 떨어지는 단점이 있다.

2.2. CTSBP 채널 예측방법

그림 2는 CTSBP 채널 예측 방법을 나타낸다. CTSBP는 BTSBP와 달리 p 심볼 지연을 보상하기 위해 p 심볼마다 채널 값을 입력받아 현재의 채널 값에서 p 만큼 떨어진 채널을 예측한다. 이는 단일 스텝 채널 예측 방식과 유사하지만 단일 스텝 채널 예측 방식보다 표본화율이 $1/p$ 배 느리며 채널 예측 입력의 범위가 BTSBP에 비해 p 배 넓다. 식 (3)은 CTSBP의 채널 예측 방법을 나타낸다.

$$\hat{H}_{i+p} = \sum_{j=1}^M \tilde{w}_j H_{i-(j-1)p} \quad (3)$$

여기서 H_i 는 예측 필터의 입력인 i 시간의 채널 값이며 \tilde{w}_j 는 CTSBP의 가중치, \hat{H}_{i+p} 는 예측된 채널 값을 나타낸다. CTSBP의 가중치는 식 (4)의 과정을 통하여 얻을 수 있다.

$$\tilde{w} = \tilde{\Phi}^{-1}\tilde{z} \quad (4)$$

여기서 $\tilde{\Phi}$ 는 각각 p 만큼 떨어진 N 개의 채널 입력으로부터 얻은 공분산행렬[6]의 상관행렬이며, \tilde{z} 는 공

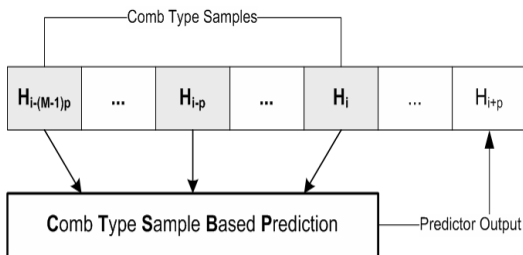


그림 2. CTSBP채널 예측방법

분산 행렬과 벡터 $[H_i H_{i-p} H_{i-2p} \dots H_{i-(M-1)p}]$ 의 상호 상관 행렬이다.

III. 다중 스텝 채널 예측기법을 적용한 적응전송 SISO/MIMO-OFDM 시스템

3.1. 적응전송 SISO / MIMO-OFDM시스템의 문턱값 결정

본 논문에서는 적응 전송을 위한 문턱 값을 실험을 통한 경험적인 값으로 결정하며 문턱 값 결정 기준은 3×10^{-2} 비트오율을 만족시키는 신호 대 잡음 비로 하며 시스템에서 사용되는 전송 방식은 비전송, BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM의 다섯 단계로 결정한다⁷⁾. 이 결정 기준을 바탕으로 Vehicular A 60km/h 채널⁸⁾에서 신호 대 잡음비를 변화 시켜가며 문턱 값을 결정한다. 표 1은 결정된 SISO 및 MIMO 시스템의 전송 방식 결정 문턱 값을 나타낸다.

그림 3은 SISO-OFDM 시스템에서 표 1의 문턱 값을 적용한 경우 순시 신호 대 잡음비를 바탕으로 결정된 각 부반송파의 전송 방식을 나타낸다.

표 1. Vehicular A 60km/h 환경에서의 적응전송 SISO / MIMO-OFDM의 문턱값

	SISO	MIMO
비전송	-	-
BPSK	5dB	3dB
QPSK	18dB	6dB
16QAM	23dB	12dB
64QAM	28dB	18dB

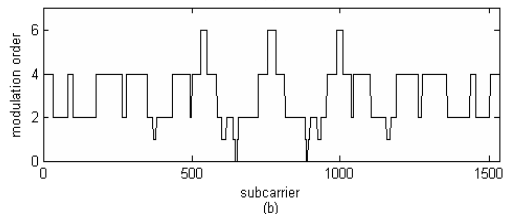
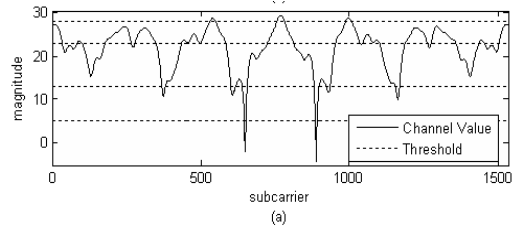


그림 3. 적응전송 SISO-OFDM 시스템에서 채널 값에 따른 변조방식 결정 (a) 각반송파의 채널 값과 문턱값 (b) 각 부반송파의 채널 값에 따른 변조지수

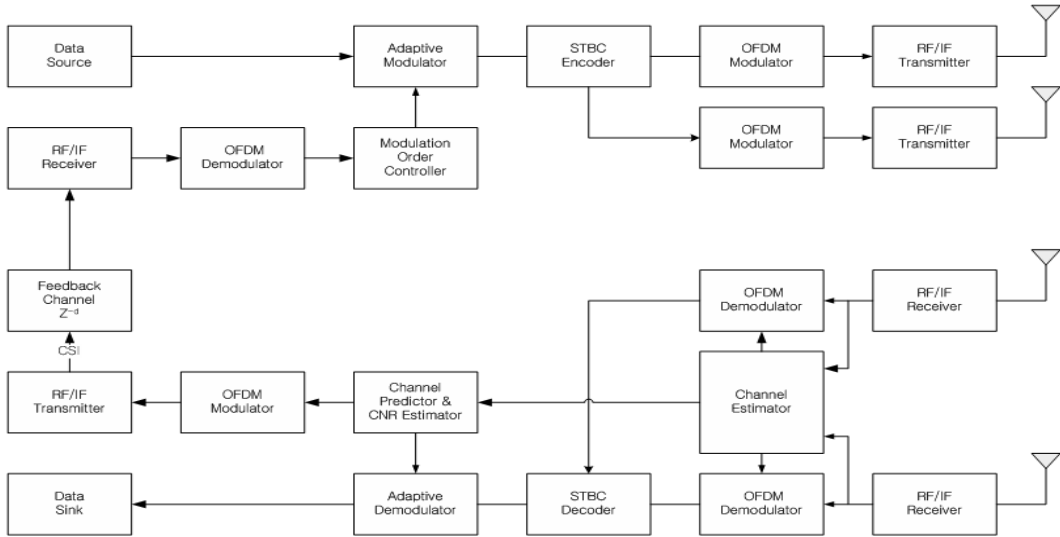


그림 4. 다중스텝 채널 예측기를 포함한 적응전송 MIMO-OFDM 시스템

3.2. 다중 스텝 채널 예측기를 포함한 적응전송 MIMO-OFDM 시스템

그림 4는 다중 스텝 채널 예측기를 포함한 적응 전송 MIMO-OFDM 시스템을 나타내고 있다. 본 논문에 제안된 MIMO-OFDM 시스템은 시공간 다이버시티 방법의 하나인 Alamouti 방법^[6]을 사용하고 있으며 송수신 안테나는 각각 두 개이며 ZF(zero forcing) 수신기^[10]를 사용한다. 일반적인 MIMO-OFDM 시스템에 CSI 예측정보를 사용하여 적응 전송을 하기 위해 기지국에는 Adaptive Modulator와 Modulation Order Controller를 적용하였으며 단말기에는 Adaptive Demodulator와 CSI를 생성하고 되먹임 하기위한 Channel Predictor & CNR Estimator를 적용하였다. 먼저 기지국의 Modulation Order Controller는 단말로부터 되먹임된 CSI 정보를 프레임단위의 변조 정보로 변환하고 Adaptive Modulator는 이 변조 정보를 바탕으로 심볼의 변조 방식을 결정하여 이에 맞는 심볼을 출력 한다. 출력된 심볼은 STBC Encoder와 OFDM Modulator를 거쳐 단말로 전송된다.

단말은 기지국으로부터 전송되어 채널을 통과한 신호를 OFDM Demodulator와 Channel Estimator에 입력하여 채널 정보와 수신 심볼을 생성하고 이를 각각 Channel Predictor & CNR Estimator와 STBC Decoder에 전달한다. 단말의 Channel Predictor & CNR Estimator에서는 입력된 채널 값을 바탕으로 지연을 감안한 CSI를 생성하고 이전 프레임의 CSI를 Adaptive Demodulator에 전달하여 기지국에서

적용한 변조 방식의 역과정을 수행하도록 한다. 위의 과정에서 생성된 CSI는 OFDM Modulator를 통과하여 기지국으로 되먹임 된다.

3.3. 프레임 단위 채널 예측

일반적인 통신 시스템은 프레임을 기본단위로 하여 제어신호와 데이터를 할당하여 전송한다. 그러므로 채널 예측 또한 프레임 단위 전송을 고려하여야 한다.

그림 5는 단말에 전달되는 프레임단위 심볼을 바탕으로 한 채널 예측 방법을 나타내고 있다. 프레임은 $n+1$ 개의 심볼로 구성되어 있고 각 심볼 S_i 의 아래첨자는 프레임에서의 심볼의 위치를 나타낸다. 심볼 S_0 를 기준으로 다음 프레임의 심볼 S_0 를 예측하기 위해서는 프레임의 심볼 개수 $n+1-1$ 과 되먹임 지연을 감안한 스텝 길이를 갖는 예측 필터를 사용해야 적절한 예측을 할 수 있다. 다시 말해 그림 1과 그림 2의 BTSBP와 CTSBP의 예측 스텝 길이를 프레임 당 심볼 수-1+되먹임 채널의 지연으로 설정해야 한다. 이와 같이 프레임 단위 채널 예측을 하

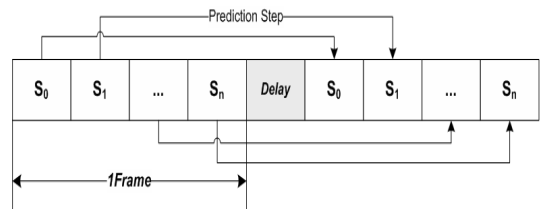


그림 5. 프레임 단위 채널 예측 방법

기위해서는 프레임 당 심볼 수 × 예측필터 탭 수 × 데이터 부반송파의 수만큼의 저장 공간이 요구된다. 또한 2×2 MIMO 시스템에서 4개의 독립적인 채널을 추정하여 예측한다고 하면 저장 공간 요구량은 4배 증가한다.

IV. 채널 정보 되먹임 오버헤드 감소기법

OFDM 시스템이 이상적으로 적응 전송을 하기 위해서는 모든 부반송파에 대한 CSI정보를 보내야 한다. 그러나 모든 부반송파에 대한 CSI정보를 기지국으로 되먹임하면 되먹임 오버헤드에 의한 대역폭 손실을 가져올 수 있다. 그러므로 되먹임 오버헤드를 줄이기 위해 되먹임 CSI 정보의 양을 조절할 필요가 있다.

IV장에서는 파일럿 신호를 이용하여 채널을 추정할 때 사용하는 선형보간법^[11]과 Comb형 파일럿 구조^[12]를 사용하여 CSI 되먹임 오버헤드를 줄이고 더불어 단말기의 채널예측기로 인한 복잡도를 감소시키는 방안을 제안한다.

$$\hat{H}(n) = \hat{H}(p_i) + \frac{\hat{H}(p_{i+1}) - \hat{H}(p_i)}{p_{i+1} - p_i} \cdot (n - p_i), \text{ for } p_i \leq n \leq p_{i+1} \quad (5)$$

여기서 p_i 는 선형보간을 위해 사용될 예측된 채널 정보의 위치, $\hat{H}(p_i)$ 는 p_i 에 해당하는 예측 채널 정보의 값을 나타내며 n 은 보간 될 채널정보의 위치를 나타낸다. 그림 6은 선형보간법을 바탕으로 예측된 채널정보의 보간 간격에 따른 MSE를 나타낸다. 여기서 Reference Date Interval은 예측 채널 정보의 보간 간격을 나타낸다. 간격이 50일 때 MSE는 약 10^{-1} 이며 이때 사용되는 심볼 당 채널예측기의 수는 $\lceil 1536/50 \rceil$ 이므로 31개, 오버헤드 감소율은 $1 - 31/1536 \approx 0.9798$ 이므로 약 98%이다.

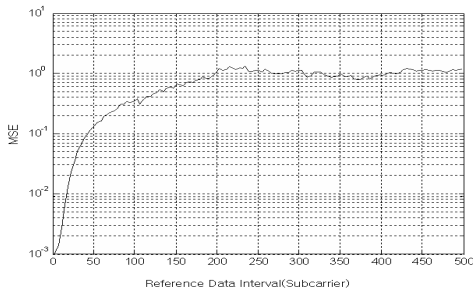


그림 6. 예측된 채널정보의 보간 간격에 따른 MSE

표 2. OFDM 시스템 파라미터

파라미터	값
반송 주파수	5GHz
대역폭	20MHz
샘플링 주파수	25MHz
FFT 크기	2048
데이터 부반송파수	1536
유효 심볼 구간	81.92μs
보호 구간	18.08μs
OFDM 심볼 구간	100μs

V. 모의실험

모의실험은 표 2의 OFDM 시스템 파라미터를 기본으로 MIMO / SISO 시스템을 바탕으로 수행하며 채널은 Vehicular A, 단말기의 속도는 60km/h로 가정한다.

모의실험에 사용되는 채널 예측기의 탭 수와 샘플 수는 그림 7과 8의 실험결과를 기준으로 결정한

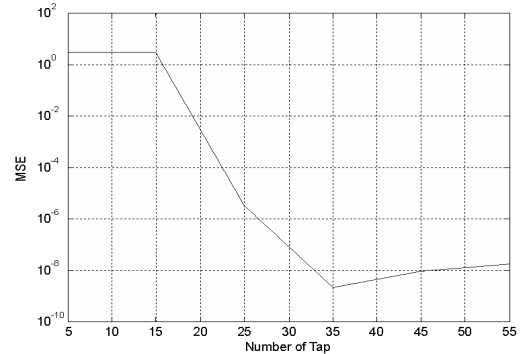


그림 7. 채널 예측 필터의 탭수에 따른 MSE

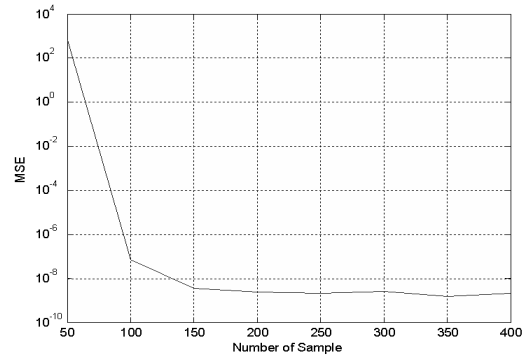


그림 8. 채널 예측 필터의 가중치벡터 생성에 사용되는 샘플수에 따른 MSE

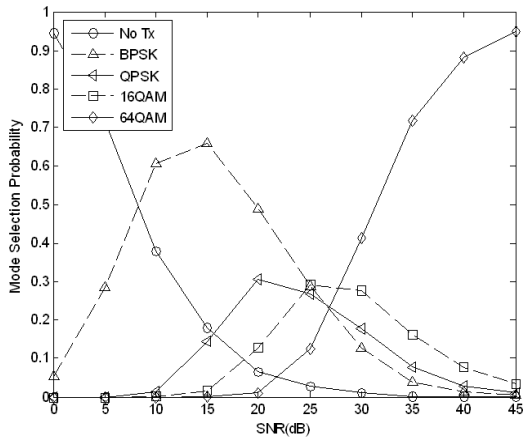


그림 9. 적응전송 SISO-OFDM 시스템에서의 전송모드 변환 추이

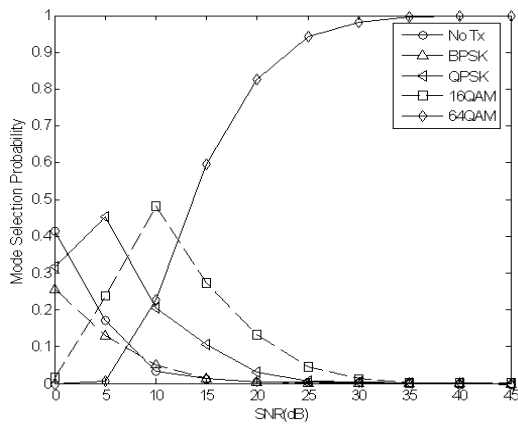


그림 10. 적응전송 MIMO-OFDM 시스템에서의 전송모드 변환 추이

다. 필터의 탭 수는 35탭일 경우 MSE가 10^{-9} 로 가장 이상적인 성능을 보이며 채널 샘플 수는 300 개 이상 일 때 10^{-9} 로 수렴하는 성향을 띄어 100개의 여분을 두어 400개로 정한다. 본 논문에서는 heuristic한 접근으로 필터 탭 수를 정했지만 실제 시스템에서 필터의 탭 수를 정하기 위해서는 training 데이터를 이용 예측 CSI의 MSE를 자동측정하여 탭 수에 따른 MSE의 추이를 보고 최소 MSE를 갖는 탭 수를 필터의 탭 수로 결정한다.

그림 9과 10은 적응 SISO-OFDM / MIMO-OFDM의 신호 대 잡음비 증가에 따른 전송 모드 변화추이를 나타낸다. SISO와 MIMO 공통적으로 신호 대 잡음비가 증가할수록 많은 정보를 보내며 MIMO의 경우 데이터의 신뢰도가 높아 표 1과 같이 전송 모드 변환 문턱 값이 작기 때문에 SISO일

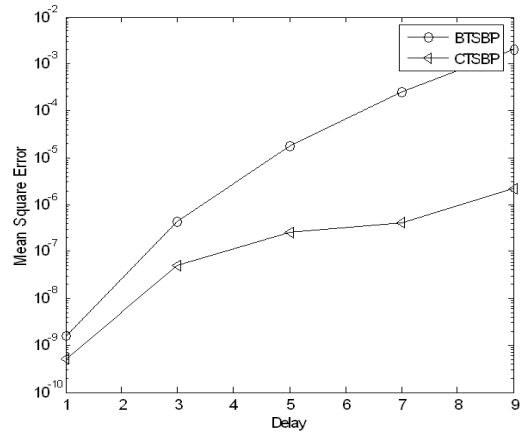


그림 11. BTSBP와 CTSBP의 MSE 비교 (Vehicular A / 60km/h)

때보다 낮은 신호 대 잡음비에서부터 높은 변조 방식을 사용한다.

그림 11은 BTSBP와 CTSBP의 MSE 성능을 비교한 그래프이다. 그래프에서 보여주듯이 두 방식 모두 되먹임 지연이 증가할수록 MSE가 커지는 성향을 나타내지만 CTSBP의 경우가 BTSBP의 경우보다 지연시간 증가 대 MSE 증가 비율이 작다. 적은 지연환경에서 CTSBP와 BTSBP의 작은 MSE 차는 지연이 증가할수록 점점 커진다. 이 그래프를 바탕으로 CTSBP가 다중지연 환경에서 BTSBP보다 정확하게 채널 정보를 예측한다는 것을 알 수 있다.

그림 12와 13은 SISO / MIMO-OFDM시스템, 채널 신호 대 잡음비(channel estimation signal to noise ratio : CESNR) 50dB, 전송 지연 3일 때 신호 대 잡음비에 따른 CTSBP와 BTSBP의 데이터 율 변화를 보여준다. 그림 11에서 전송 지연이 증가할수록 CTSBP가 BTSBP에 비해 MSE 증가폭이 줄어들음을 알 수 있다. 이와 마찬가지로 그림 12와 13은 같은 채널 신호 대 잡음비에서 전송지연이 증가할수록 BTSBP가 더 낮은 데이터 율을 보임을 나타낸다. SISO-OFDM 시스템에서 전송지연이 3일 때와 5일때 CTSBP의 데이터 율 변화는 미미하지만 BTSBP의 경우는 최대 데이터 율이 82Mbps에서 48Mbps로 감소한다.

본 논문에서 사용하고 있는 시공간 다이버시티 MIMO-OFDM 시스템의 경우는 두 심볼 구간 동안 일정한 채널을 가정한다. 단말기의 속도를 60km/h로 가정시 Coherence 시간인 3.6ms이며 이에 비해 한 심볼 주기는 100us로 상대적으로 아주 작은 값으로 두 심볼 구간에서 발생하는 채널 변화로 인한

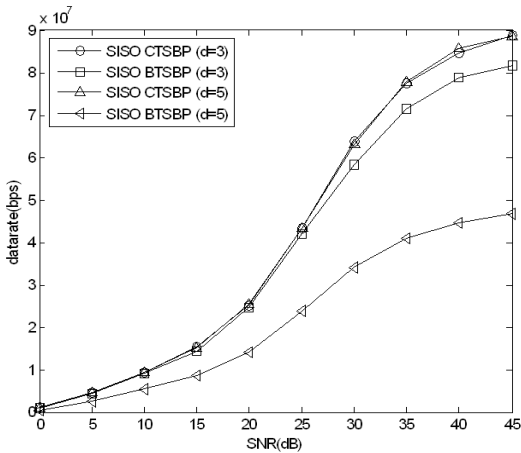


그림 12. SISO-OFDM 시스템에서의 CTSBP와 BTSBP의 데이터 율 비교 (CESNR 50dB)

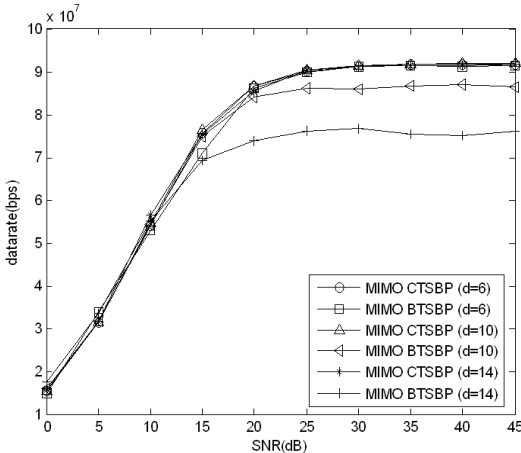


그림 13. MIMO-OFDM 시스템에서의 CTSBP와 BTSBP의 데이터 율 비교 (CESNR 50dB)

성능의 차이는 미미하다고 볼 수 있다. 그림 13과 같이 전송 지연이 6일 때는 CTSBP와 BTSBP의 최대 데이터 율이 이상적인 약 90Mbps이지만 CTSBP의 경우 전송지연 증가에 따른 데이터 율 변화가 미미한 반면 BTSBP의 경우는 데이터 율이 점점 감소하여 전송 지연이 14 일 때 최대 데이터 율은 약 76Mbps로 감소한다.

VI. 결론

본 논문에서는 부반송과 단위로 적응 전송을 하는 MIMO-OFDM 시스템에서 CSI 지연에 따른 시스템의 성능 저하를 효율적으로 보상하며 다양한 채널에 손쉽게 적용이 가능한 최소 제공법 기반의

예측기, 특히 BTSBP 및 CTSBP에 비해 상대적으로 다중지연에 강건한 CTSBP 다중 스택 채널 예측기를 적용한 SISO / MIMO-OFDM 시스템을 제안하였다. 또한 채널 추정 오류에 대한 강건함을 분석하기 위해 CTSBP를 적용한 적응전송 SISO / MIMO-OFDM 시스템에서 채널 추정오류에 대한 채널 추정 성능 및 시스템의 데이터 율 변화 추이에 대해 분석하였다. 또한 되먹임 오버헤드를 감소시키기 위한 예측 채널 정보의 선형 보간 방법을 제안하였다.

CTSBP는 BTSBP에 비해 가중치 벡터를 생성하는 상호 상관벡터의 구조적인 특성 때문에 다중지연에 강건한 특성을 보였다. 그러므로 다중지연이 존재하는 채널에서는 CTSBP를 적용한 시스템이 보다 효율적이라고 할 수 있다. CTSBP를 적용한 시스템의 채널 추정 신호 대 잡음비에 따른 성능 분석에서는 SISO 시스템에 비해 MIMO 시스템에서 보다 강건한 특성을 보였다. 이는 MIMO 시스템의 다이버시티 특성 때문에 채널 추정 오류가 보상되었기 때문이다.

본 논문에서는 가중치 벡터의 변환이 없는 고정적인 채널 예측 필터를 사용하여 채널 예측을 수행하고 이 방식을 MIMO-OFDM에 적용함으로써 지연, 채널 추정 오류 등 악조건 채널 환경에 강건한 고속 시스템을 제안한다. 향후 시시각각 변하는 채널을 효율적으로 예측하기 위한 가중치 벡터를 변화시키는 채널 상황에 따라 적응적으로 변화 시키는 적응 채널 예측기를 갖는 MIMO-OFDM 시스템에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] W.T. Webb and R. Steele, "Variable rate QAM for mobile radio," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, pp. 2223-2230, Jul.1995.
- [2] M. R. Souryal, R. L. Pickholtz, "Adaptive Modulation with Imperfect Channel Information in OFDM," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 6, pp. 1861-1865, June, 2001.
- [3] A. Duel-Hallen, S. Hu and H. Hallen, "Long Range Prediction of fading signals," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 17, pp. 62-75, May 2000.
- [4] T. Hwang, H. Hwang, H. Baik, "Adaptive OFDM with Channel Predictor over

Frequency-Selective and Rapid Fading Channel,” *IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Commun.(PIMRC 14th)*, vol.1, pp. 859-863, Sept. 2003.

- [5] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice-Hall, 1991.
- [6] S. Choe, M. Uysal, “Robust autoregressive predictive power control method for mobile CDMA systems,” *Electronics Letters*, vol. 42, issue 15, pp. 866-868, July 2006.
- [7] B. Choi, L. Hanzo, “Optimum Mode-Switching-Assisted Constant-Power Single-and Multicarrier Adaptive Modulation,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.52, pp.536-560, May. 2003.
- [8] Recommendation ITU-R M.1225, Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, 1997.
- [9] S. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications”, *IEEE Journals on Selected Areas in Communications*, vol. 16, pp 1451-1458, Oct. 1998.
- [10] A. Paulraj, R. Narbar, D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge University, 2003.
- [11] L. Hanzo, M. Munster, B. J. Choi, T. Keller, *OFDM and MC-CDMA*, Wiley, March. 2004.
- [12] 오성근, 남기호, “시변 주파수 선택적 채널에서 OFDM 시스템을 위한 Curve-Fitting 채널 추정 방법”, *전자공학회 논문지 제43권 TC 제3호*, 2006년 3월.

김 현 동 (Hyun-dong Kim)

정회원



2004년 8월 가톨릭대학교 반도체시스템공학과 졸업
 2007년 2월 가톨릭대학교 컴퓨터공학과 석사
 2007년 1월~현재 삼성전자 <관심분야> OFDM, LTE

최 상 호 (Sangho Choe)

중신회원



2001년 5월 Texas A&M Univ. 박사
 2003년 3월~현재 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 부교수
 <관심분야> MIMO-OFDM, 무선센서네트워크, Cognitive Radio