

# 이동 페이딩 채널하의 멀티 스텝 채널 예측기를 이용한 적응 OFDM 시스템의 성능개선

정희원 안 현 준\*, 김 현 동\*\*, 최 상 호\*\*\*

## Performance Improvement on Adaptive OFDM System with a Multi-Step Channel Predictor over Mobile Fading Channels

Hyun-Jun Ahn\*, Hyun-Dong Kim\*, Sang-Ho Choe\*\* *Regular Members*

### 요 약

적응 변조 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송 기법은 각 부반송파의 채널 상태에 따라 변조방식을 적절히 변화시켜 무선 채널의 다중 경로 페이딩에 의해 의한 영향을 최소화하여 시스템의 성능을 증가시키는 방식이다. 시스템이 적응적으로 전송하기 위해서는 단말기에서 각 부반송파(subcarrier)별 채널 상태 정보 (Channel State Information : CSI)를 되먹임 채널을 통해 실시간으로 기지국으로 전송해 주어야한다. 하지만, 단말기에서 데이터를 처리할 때 걸리는 시간과, 단말기에서 기지국으로 CSI를 되먹임(feedback) 할 때 걸리는 시간으로 인한 되먹임 지연(feedback delay)  $d$ 가 발생하게 된다. 이 되먹임 지연은 CSI 정보의 불일치를 발생시켜 적응 OFDM 시스템의 성능저하를 일으킨다. 본 논문에서는 CSI의 되먹임 지연  $d(\geq 2)$ 를 적절히 보상하는 주파수 축 멀티 스텝 채널 예측기를 제안하고 이를 적응 전송 OFDM 시스템에 적용하고 모의실험을 통하여 기존의 OFDM 시스템, 기존의 채널 예측방식과의 성능을 MSE(mean square error), 비트오율(bit error rate : BER) 및 채널용량을 바탕으로 비교한다.

**Key Words :** Adaptive OFDM, CSI, Multi-step prediction

### ABSTRACT

Adaptive OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) improves data capacity and system performance over multipath fading by adaptively changing modulation schemes according to channel state information(CSI). To achieve a good performance in adaptive OFDM systems, CSI should be transmitted from receiver to transmitter in real time through feedback channel. However, practically, the CSI feedback delay  $d$  which is the sum of the data processing delay and the propagation delay is not negligible and damages to the reliability of CSI such that the performance of adaptive OFDM is degraded. This paper presents an adaptive OFDM system with a multistep predictor on the frequency axis to effectively compensate the multiple feedback delays  $d(\geq 2)$ . Via computer simulation we compare the proposed scheme and existing adaptive OFDM schemes with respect to data capacity and system performance.

### 1. 서론

이동 전화나 PDA 같은 이동 통신 기기들이 많이 보급되고 이에 부응한 각종 콘텐츠의 개발로 고속의 멀티미디어 서비스를 받으려는 사용자들이 많

아지고 있다. 하지만, 유선 채널과는 달리 무선 채널은 다중경로 감쇄 (multipath fading) 현상으로 인해 채널환경이 좋지 않으며, 그에 따라 고속 데이터 서비스의 제공을 위해 전송률을 높이는 데에도 많은 제약을 갖고 있다.

※ 본 연구는 2006년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

\* 포스테이타, \*\* 가톨릭대학교 일반대학원 컴퓨터공학과, \*\*\* 가톨릭대학교 정보통신 전자공학부  
 논문번호 : KICS2006-09-370, 접수일자 : 2006년 9월 4일, 최종논문접수일자 : 2006년 11월 29일

직교 주파수 분할 다중화(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 방식은 기존의 DAB (Digital Audio Broadcasting)나 DVB (Digital Video Broadcasting)와 같은 디지털 방송과 IEEE802.11a나 HIPERLAN/2와 같은 무선랜 등에 널리 쓰여 왔으며, 다중 경로 감쇄에 강인하고 일부 부반송파에만 영향을 주는 협대역 간섭에 강인한 특성을 갖고 있다. 즉, OFDM은 지연 확산(delay spread)을 갖는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 ISI의 적절한 보상으로 전송률을 높여줄 수 있는 방식이다.

적응 OFDM 전송 기법은 되먹임 채널로 전송되는 채널 CSI에 따라 부반송파에 대한 데이터 전송률을 적응적으로 조절함으로써 OFDM 전송 용량을 더욱더 향상시킬 수 있는 방식으로 각종 고속 멀티 미디어 서비스가 가능한 차세대 무선통신 시스템에 적용되고 있으며 4세대 이동통신 시스템의 표준화 방식중 하나로도 검토되고 있다. 적응 OFDM 전송 기법은 변조방식, 부호율, 전력 등을 채널 상태에 따라 적절하게 적응시켜서 시스템의 성능을 개선시킬 수 있으며 그에 따른 다양한 연구가 진행되어왔다<sup>1-2)</sup>. 적응 시스템 성능 저하를 시키는 주된 요인 중 하나는 되먹임 채널을 통한 지연  $d$ 로 수신기에서 데이터를 처리할 때 걸리는 지연(data processing delay)과 수신기에서 송신기로 CSI를 전송과정에서 걸리는 지연(propagation delay)의 합으로 표현되며 이 지연은 일반적으로 이동 통신 채널 환경하에서 수개~수십개(단위: OFDM 심볼) 이상이다.

기존 시스템은 CSI 전송지연을 고려하지 않은 채널 추정값에 따른 채널 상태 정보를 이용한 기존의 적응 OFDM 기법<sup>3)</sup>이나, 단일 심볼 지연 보상을 하여주는 단일 스텝 예측기를 내장한 적응 OFDM 기법<sup>4)</sup>을 사용하였으나 멀티 샘플 지연  $d(\geq 2)$ 에 대한 적절한 보상이 이루어지지 못해 고속 페이딩 조건하에서 성능저하가 발생한다. 이에 따라 최근에 이러한 다중 샘플 지연  $d$ 를 적절히 보상하여주는 멀티 스텝 예측 방식에 기초한 적응 OFDM을 제안하였지만<sup>5)</sup>, 이 예측 방식은 주파수 영역이 아닌 시간영역에서 채널 예측을 수행하고 있어 주파수 영역의 각 부반송파별 독립적인 특성을 간과하여 적응 OFDM 시스템의 CSI 지연 보상을 위한 근원적 해결책이 되지 못한다.

본 논문에서는 주파수 선택적 페이딩 환경에서 다중 지연을 적절히 보상하기 위한 주파수 영역 샘플 입력에 기초한 단일 스텝 예측 샘플 재사용 방식<sup>6)</sup>, 고속 샘플에 기초한 예측 방식<sup>4)</sup>, 그리고 최근

에 제안된 저속 샘플에 기초한 채널 예측 방식<sup>7)</sup>을 이용한 멀티 스텝 채널 예측기들의 성능을 비교하고 이를 통하여 적응 OFDM 시스템에 적절한 채널 예측기를 선정한다. 모의실험 결과 CSI 전송 지연  $d$ 의 증가에 저속 샘플 방식이 상대적으로 다른 방식에 비해 가장 둔감한 특성을 가짐을 확인한다. 설계된 적응 OFDM 시스템에서는 예측 AR(Autoregressive) 필터 방식으로 시변 상관 특성의 다중 경로 페이딩의 통계적 상관함수의 실시간 도출이 어려워 실제 구현상의 문제점을 갖는 MMSE 방식<sup>5)(8)</sup> 대신 LS 방식<sup>9)</sup>을 선정한다. 제안된 방식의 시뮬레이션을 위하여 사용한 채널 환경은 ITU-R Vehicular A이며 Jakes 모델을 바탕으로 구현한다.

본 논문의 구성의 다음과 같다. II장에서 멀티 스텝 채널 예측 방식에 대해 비교하여 보고, III장에서는 멀티 스텝 예측기를 갖는 적응 변조 OFDM 시스템을 제안하며 IV장에서는 컴퓨터 모의실험 결과를 보여준다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 멀티 스텝 채널 예측 방식

멀티 스텝 채널 예측 방식은 AR(Autoregressive)<sup>10)</sup> 필터를 기반으로 하여  $p$ 스텝후인 미래 채널 샘플을 예측하는 방식이다. 본 논문에서는 스텝 크기  $p$ 는 지연  $d$ 와 동일한 정수값을 갖으며 그 단위는 OFDM 심볼 한 주기  $T$ 에 해당한다. 본 논문에서는 구현상의 이점을 고려하여 시변 페이딩 채널에 대해 자기 상관 함수 추정이 어려운 MMSE 필터 대신 LS (Least Squares)<sup>9)</sup> 필터를 사용한다. II장에서는 기존의 제안된 세 가지 멀티 스텝 채널 예측 방식을 상호 비교하며 그 결과를 바탕으로 적응 OFDM 시스템에 적절한 예측 방식을 선정한다. 채널 예측 필터에 입력되는 샘플은 이상적인 채널 추정 샘플을 가정한다.

### 2.1 단일 스텝 예측의 반복 재사용에 인한 멀티스텝 예측

단일 스텝 예측방법의 반복 재사용으로 인한 멀티스텝 예측 방법은 그림 1과 같이 연속된 현재와

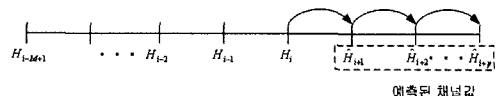


그림 1. 단일 스텝 예측방법의 반복 재사용으로 인한 멀티스텝 예측 방법

과거의 채널 샘플들을 바탕으로 단일 스텝 예측 샘플을 얻고, 이 예측된 샘플을 재사용해 다음 스텝 예측을 하는 과정을 반복함으로써 스텝  $p$  후의 멀티 스텝 예측을 하는 방식<sup>[7]</sup>이며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 표본화율은  $f_s = 1/T$  이다.

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

여기서  $H_i$ 는 단말기의 이상적인 채널 추정을 통해 얻은 시간  $i$ 에서의 채널 값을,  $M$ 은 필터 탭의 길이를 나타내고  $w_k$ 는 탭 가중치를 나타낸다. 탭 가중치 벡터  $w_s = \{w_i | i=1, \dots, M\}$ 는 다음과 같은 식에 의해 얻는다.

$$w_s = \Phi_s^{-1} z_s \quad (2)$$

여기서  $\Phi_s$ 는 필터 입력 벡터  $H_r = \{H_i, H_{i-1}, \dots, H_{i-M+1}\}$ 의  $M \times M$  시간평균 상관행렬이고,  $z_s$ 는 필터 입력 벡터  $H_r = \{H_i, H_{i-1}, \dots, H_{i-M+1}\}$ 와 예상 출력 벡터  $H_d = \{H_{i+1}, H_i, \dots, H_{i-M+2}\}$ 의 시간 평균 상호 상관 벡터이다<sup>[9]</sup>.

재사용에 의한 멀티 스텝 예측 방안은 예측된 샘플을 계속 반복하여 재사용함에 의해 예측 에러가 계속해서 누적전파 (error propagation) 되어  $p$ 가 증가함에 따라 MSE가 기하급수적으로 증가하여 CSI 되먹임지연이 작은 환경에서만 제한적으로 사용될 수 있다.

### 2.2 고속 샘플에 기초한 멀티 스텝 예측

고속 샘플에 기초한 멀티 스텝 예측 방법<sup>[4]</sup>은 기존에 널리 이용되고 있는 방식으로 고속 샘플링으로 얻은 현재와 과거 샘플에 기초하여 미래 샘플을 예측하는 방식으로 예측기 입력 샘플 벡터의 샘플링율은  $f_s = 1/T$ 이다.

그림 2와 같이 연속되어진 채널 값을 사용하여 송수신부의 스텝  $p$  후의 멀티 스텝 예측을 하는

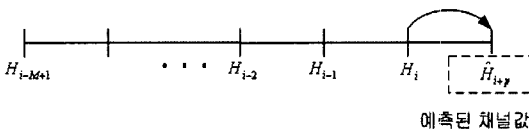


그림 2. 고속 샘플에 기초한 멀티 스텝 예측 방법

방식으로, 이는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\widehat{H}_{i+p} = \sum_{j=1}^M w_j H_{i-(j-1)} \quad (3)$$

여기서,  $w_h = \{w_j | j=1, \dots, M\}$ 는 필터의 탭 가중치 벡터를 나타내며 이는 식 (4)를 통하여 구할 수 있다.

$$w_h = \Phi_h^{-1} z_h \quad (4)$$

단, 고속 멀티 스텝 예측 필터의 시간평균 상관행렬  $\Phi_h$ 와 시간 평균 상호 상관 벡터  $z_h$ 는 필터 입력 벡터  $H_r = \{H_i, H_{i-1}, \dots, H_{i-M+1}\}$ 와 요구 응답 벡터  $H_d = \{H_{i+p}, H_{i+p-1}, \dots, H_{i+p-M+1}\}$ 를 이용하여 얻는다.

고속 샘플에 기초한 멀티스텝 예측 방안은 상관도가 높은 인접 샘플을 사용하여 예측하므로 되먹임 지연  $d$ 가 작을 경우에는 예측성능이 우수한 반면에 되먹임 지연  $d$ 가 점점 커짐에 따라 가중치 벡터를 구성하는 채널 샘플의 수집범위(span)가 작아 상관함수가 채널의 변화를 충분히 반영하지 못하게 되어 MSE의 증가를 가져오게 된다.

### 3. 저속 샘플에 기초한 멀티 스텝 예측 방법

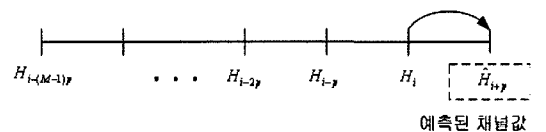


그림 3. 저속 샘플에 기초한 멀티스텝 예측방법

저속 샘플에 기초한 멀티 스텝 예측은 본 논문에서 적용 OFDM 시스템에 적용한 방법으로서, 그림 3과 같이  $p$ 스텝씩 떨어져있는 현재와 과거의 채널 샘플 값들을 이용해서 현재로부터  $p$ 스텝 이후의 미래 채널 값을 예측하는 방식<sup>[7]</sup>이다. 다시 말해 고속 샘플 예측 방식에 비해 이 방식은 샘플링 속도가  $p$ 배 만큼 늦어짐 ( $f_s = \frac{1}{pT}$ )을 알 수 있다. 저속 샘플에 기초한 멀티 스텝 예측기는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\widehat{H}_{i+p} = \sum_{j=1}^M w_j H_{i-(M-1)p} \quad (5)$$

여기서, 필터의 탭 가중치 벡터  $w_i = \{w_j | j = 1, \dots, M\}$ 는 다음과 같이 구한다.

$$\hat{w}_i = \Phi_i^{-1} z_i \quad (6)$$

단, 저속 멀티 스텝 예측 필터의 시간평균 상관 행렬  $\Phi$ 과 시간 평균 상호 상관 벡터  $z$ 은 필터 입력 벡터  $H_r = \{H_i, H_{i-p}, \dots, H_{i-(M-1)p}\}$ 와 요구 응답 벡터  $H_d = \{H_{i+p}, H_i, \dots, H_{i-(M-2)p}\}$ 를 이용하여 얻는다.

저속 샘플 방안은 비교적 상관도가 적은  $p$ 스텝 간격의 채널 값들을 바탕으로 예측을 하게 되어  $p$  값이 적을 경우(약 2 이하) 고속 샘플 방식에 비해 MSE 성능이 다소 떨어지나 그 차이는 크지 않다(IV장의 그림 7 참조). 하지만  $p$ 값이 클 경우 저속 샘플 방안은 샘플의 수집 범위가 고속 샘플 방안에 비해 상대적으로 커짐에 따라 상관함수가 채널의 변화 추이를 더 잘 반영할 수 있게 된다. 이에 따라 큰 되먹임 지연  $d$  (수~수십 이상)를 갖는 적응 OFDM 시스템의 경우 저속 샘플 방식이 여타 방식에 비해 채널 예측 MSE를 적절히 낮추어 줄 수 있다.

### III. 멀티 스텝 예측 방식을 적용한 적응 변조 OFDM 시스템

그림 4에서는 적응 변조 OFDM 시스템의 블록도를 보여주고 있으며 수신기에서는 채널 상태를 나타내는 CSI를 피드백 채널을 통해서 송신기로 전송하고 송신기에서는 이 CSI를 참고하여 채널조건에 따라 적절한 변조 방식을 선정하게 된다. 즉, 채널 조건이 나쁘면 보내지 않거나 QPSK로 변조방식을 적용하여 BER을 낮추고, 채널 조건이 좋으면 16-QAM이나 64-QAM을 사용하여 전송률을 높일 수 있다. 채널 조건의 좋고 나쁨은 부반송파 단위로 판정하며 수신기에서 채널의 값을 추정하여 부반송파의 순서 SNR을 구한 후 이에 기초한 CSI 생성 후 송신기로 피드백 채널을 통해서 보내주며 동시에 수신기에 부반송파별 적절한 변조방식을 선정한다. 하지만 실제 적응 OFDM 시스템은 수개 ~ 수십개(단위: OFDM 심볼)의 피드백 지연  $d$ 를 갖고 있어 이로 인한 CSI 손상을 보상하여 주기위하여 멀티 스텝 채널 예측 필터를 갖는 적응 변조 OFDM 시스템의 설계가 요구된다.

본 논문에서는 II장에서 언급된 멀티스텝 예측방식 중 고속의 이동통신 채널에서 가장 MSE 성능이 우수한(IV장 참조) 저속 샘플에 기초한 멀티스텝

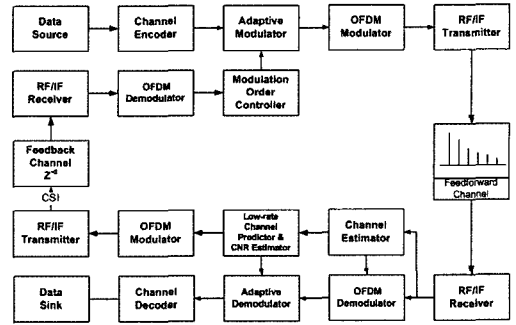


그림 4. 적응 변조 OFDM 시스템 구성도

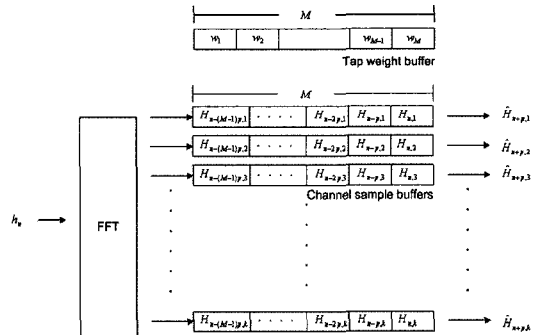


그림 5. 제안된 시스템 수신기에서의 채널 예측

예측방식을 채택 적용한 적응 변조 OFDM 시스템을 그림 4와 같이 구성한다.

제안된 시스템의 채널 예측은 시간축이 아닌 주파수 축에서 획득된 채널 샘플에 대해 이루어지며 그림 5에서 수신기의 FFT 연산 후에 얻어진 주파수 영역의 채널 샘플을 이용한 저속 샘플 예측 방안을 설명하고 있다. 수신기는  $k$ 개의 부반송파에 각각 크기  $M$ 의 버퍼를 두어 채널 샘플들을 저장하는 과정을 거치며, 이는 그림 6과 같다. 먼저  $p$ 스텝 후의 채널을 예측하기 위해서  $p \times M$  크기의 임시버퍼를 만들어 채널 값을 시간 순서로 저장하고 임시버퍼의  $n$ 번째부터  $p$ 만큼 떨어진 채널 샘플  $M$ 개를 추출하여 채널 샘플 버퍼에 저장한다. 만약 새로운 샘플이 수신되었을 때, 임시버퍼가 꽉 차 있다면, 가장 오래된 샘플인 버퍼의 가장 왼쪽 샘플은 버리고 오른쪽에서 왼쪽으로 한 샘플단위를 옮긴 후 (one sample shift left), 버퍼의 가장 오른쪽에 새로운 채널 샘플로 채우고 앞의 과정을 반복한다.  $p$ 스텝후의 예측 채널 값은 채널 샘플 버퍼에 들어있는 채널 샘플들과 탭 가중치 버퍼에 들어있는 탭 가중치 벡터를 컨볼루션하여 구한다. 예측되어진 채널 값을 사용하여 순서 SNR을 얻고, 특정 BER 조건을 만

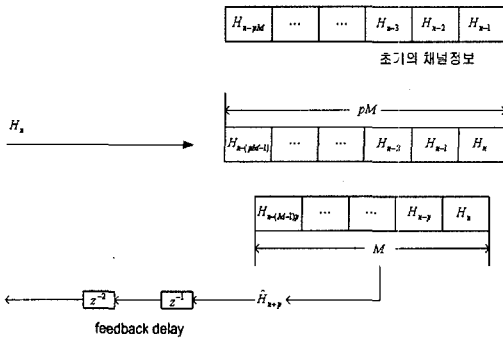


그림 6. 수신기 채널 샘플 버퍼의 저장과정

측하는 경험적 문턱값(heuristic threshold)<sup>[1]</sup>을 기준으로 정하고 4개의 변조 방식(무전송, QPSK, 16-QAM, 64-QAM) 중 미래의 예측된 채널 상태에 가장 알맞은 변조방식을 택한다. 이는 곧 채널 상태 정보(CSI)가 되며, 단말기는 이를 피드백 채널을 통하여 기지국으로 보내며 기지국은 CSI를 이용하여 적절한 적응 변조한다.

#### IV. 실험 결과

본 절에서는, 먼저 III절에선 언급한 세 가지 멀티스텝 예측채널 방식을 MSE를 통해 비교하고, 예측 방식 중 가장 성능이 좋은 방식을 택하여 적응 OFDM 시스템에 적용한 결과를 살펴본다. 적응 OFDM 시스템의 성능을 실험하기 위해 사용된 모의실험 환경은 표 1과 같다.

그림 7(a)는 수신기의 속도가 60km/h일 때 세 가지 멀티 스텝 방식의 MSE를 비교하고 있다. 단일 예측 반복 재사용 방법은 재사용시마다 오류가 누적 전파되어 다른 두 가지 방법에 비하여 이주 높은 MSE를 가짐을 알 수 있다. 고속 샘플에 기초한

표 1. OFDM 시스템 파라미터

파라미터	값
반송 주파수	5GHz
rms 지연확산	4μs
대역폭	20MHz
샘플링 주파수	25MHz
FFT 크기	2048
유효 심볼 구간	81.92μs
보호 구간	18.08μs
OFDM 심볼 구간	100μs
채널 모델	ITU-R <sup>[11]</sup> Vehicular A

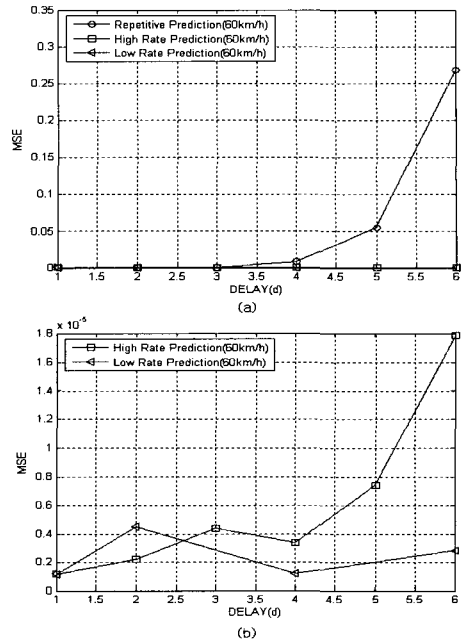


그림 7. 피드백 지연에 따른 세 가지 멀티 스텝 예측방식의 비교 (60km/h)

채널 예측 방법은 상대적으로 작은 되먹임 지연 환경에서, 즉,  $d$ 가 2 이하일 때, 저속 샘플에 기초한 채널 예측 방법과는 달리 상관도가 높은 값들을 바탕으로 예측을 하므로 가장 낮은 MSE(비록 저속 샘플 방식에 비해 큰 차이가 없지만)를 갖는다.

그러나 그림 7(b)와 같이 되먹임 지연이 상대적으로 큰 환경에서는, 즉,  $d$ 가 3 이상일 때에는 저속 샘플에 기초한 방식이 고속 샘플에 기초한 방식에 비해 적은 MSE를 가지며  $d$ 가 커짐에 따라 그 차이는 점점 증가함을 확인할 수 있다. 이는 고속 샘플에 기초한 채널 예측기의 입력 채널 벡터의 범위 (span)가 저속 샘플에 기초한 방식보다 작으므로 상관행렬이 채널의 변화를 충분히 반영하지 못하게 되어 저속 샘플에 기초한 방식이 더 낮은 MSE를 갖게 된다.

그림 8은 그림 7의 결과를 바탕으로 되먹임 지연이 5인 Vehicular A 60km/h 채널에서 저속 샘플에 기초한 멀티 스텝 채널 예측기와 기존의 단일 스텝 채널 예측기를 적용한 적응 OFDM, 그리고 예측기를 적용하지 않은 적응 OFDM의 채널용량을 상호 비교한 그래프이다. 이때 채널용량은  $3 \times 10^{-2}$  BER을 만족시키는 문턱값을 적용하여 얻었으며 채널의 순시 SNR에 따라 최대 64 QAM의 변조방법을 적용하였다. 그림 8에서는 멀티 스텝 예측기를 갖는

적응 시스템이 단일 스텝 예측기를 갖는 적응 시스템이나 예측기를 적용하지 않은 적응 시스템에 비해 되먹임 지연을 효과적으로 보상하기 때문에 월등하게 높은 채널 용량을 가짐을 보여준다. 그러나 높은  $E_b/N_0$ 에서는 최대 변조 방식이 64 QAM이므로 모든 시스템의 채널 용량이 6으로 수렴함을 알 수 있다.

그림 9는 되먹임 지연  $d$ 가 2와 5일 때의 각 환경에서 스텝  $p$ 가 2와 5인 적응 OFDM 시스템과 기존의 단일 스텝 예측기를 가진 적응 OFDM 시스템의 채널용량을 비교한 그래프이다. 제안된 OFDM 시스템의 채널 용량은 지연에 상관없이 유사한 채널용량을 보이며, 되먹임 지연에 관계없이 단일 스텝 예측기를 가진 OFDM 시스템보다 큰 채널 용량을 갖는다. 또한 단일 스텝 예측기를 가진 OFDM 시스템은 지연이 커짐에 따라 CSI의 불일치 정도가 커지므로 더 작은 채널 용량을 갖는다.

그림 10은 되먹임지연  $d$ 가 5인 환경에서 스텝이 5인 채널 예측기를 적용한 적응 OFDM 시스템의 채널 용량을 단말기의 이동속도에 따라 비교한 그래프이다. 단말기의 이동속도가 증가함에 따라 예측기에

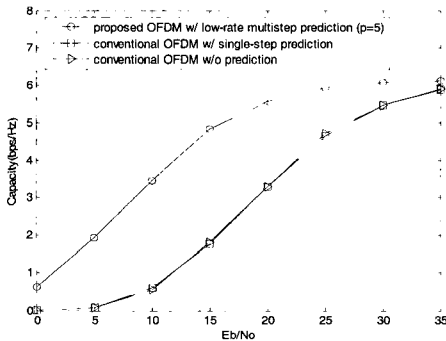


그림 8. 멀티스텝 예측기를 가진 시스템( $p=5$ ), 단일스텝 예측기를 가진 시스템, 예측기가 없는 시스템의 채널 용량 비교( $d=5$ , 60Km/h)

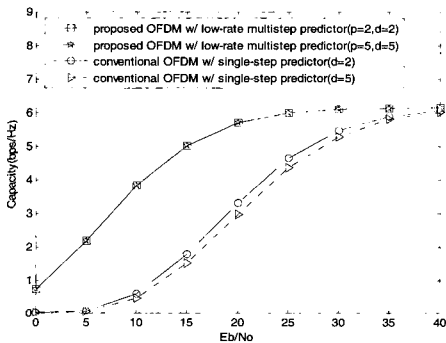


그림 9. 제안된 OFDM 시스템과 단일스텝 예측기를 사용한 OFDM 시스템의 지연에 따른 채널 용량 비교 (60km/h)

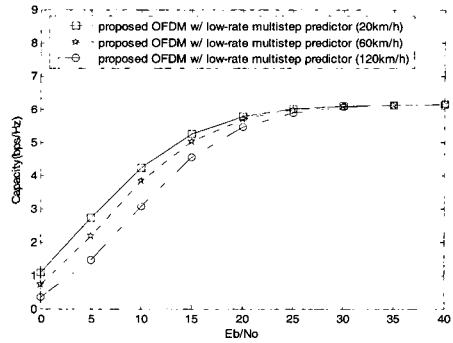


그림 10. 제안된 OFDM 시스템의 단말기 이동 속도에 따른 채널 용량 비교 ( $d=5$ ,  $p=5$ )

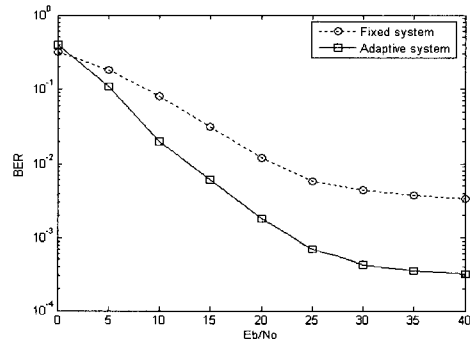


그림 11. 고정 OFDM 시스템과 적응 OFDM 시스템의 BER 비교 ( $d=5$ ,  $p=5$ , 60m/h)

입력되는 채널 벡터의 상관도가 감소하게 되어 MSE가 증가한다. 낮은  $E_b/N_0$ 에서는 이동 속도가 높을수록 낮은 채널용량을 갖게 되고  $E_b/N_0$ 가 증가하면서 모든 이동속도에서 채널용량이 6으로 수렴한다.

마지막으로 그림 11은 동일한 일정 전송률 (부반송파 당 4bit)의 조건하에 기존의 고정 변조 OFDM 시스템(QPSK 변조사용)과 본 논문에서 제안된 적응 OFDM BER의 결과를 비교한 그래프이다. 제안된 시스템이 고정 변조 시스템에 비해 채널 변화에 적응적으로 대처하여 줌으로써 상대적으로 더 낮은 BER을 갖는 것을 확인 할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 CSI 되먹임 지연을 적절히 보상해 주기위하여 주파수 영역의 멀티 스텝 예측기를 수신기에 내장한 적응 OFDM을 제안했다. 적응 OFDM에 적합한 멀티 스텝 예측기를 비교한 결과 저속 샘플 입력에 기초한 멀티 스텝 채널 예측기가

이동 다중경로 페이딩 환경 하에서 MSE 성능이 가장 우수하였다. 모의실험을 통하여 되먹임 지연이 증가할수록 제안된 적응 OFDM이 기존의 단일 스텝 채널 예측기를 가진 적응 OFDM 시스템과 비예측 적응 OFDM 시스템에 비해 채널 용량 및 성능을 개선함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[ 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 ] 박동찬, 김석찬, "적응부호율 기법을 부반송파 별로 적용한 OFDM 시스템," *한국통신학회논문지*, 제 30권, pp. 200-206, 2005년 4월.

[ 4 ] 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.

[ 5 ] 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.*, vol.1, pp. 859-863, Sept. 2003.

[ 6 ] T. Eyceoz, A. Duel-Hallen, H. Hallen, "Deterministic Channel Modeling and Long Range Prediction of Fast Fading Mobile Radio Channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, pp. 254-256, Sep, 1998.

[ 7 ] S. Choe, "Multi-step Predictive Power Control in CDMA Systems," *IEEE Int. Conf. Advanced Commun.*, vol. 1, pp. 482-484, Feb, 2005.

[ 8 ] L. L. Scharf, *Statistical Signal Process: Detection, Estimation, and Time Series Analysis*, Addison-Wesley, 1991.

[ 9 ] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Englewood Cliffs (NJ), Prentice-Hall, 1991.

[ 10 ] M. H. Hayes, *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*, John Wiley & Sons, 1996.

[ 11 ] Recommendation ITU-R M.1225, *Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000*, 1997.

안 현 준 (Hyun-Jun Ahn)

정회원



2004년 2월 가톨릭대학교 정보통신공학과 졸업  
2004년 3월~2006년 8월 가톨릭대학교 컴퓨터공학과 석사과정  
2006년 8월~현재 포스데이타 <관심분야> 무선통신 시스템,

AMC, MIMO-OFDM

김 현 동 (Hyun-Dong Kim)

정회원



2004년 8월 가톨릭대학교 반도체시스템공학과 졸업  
2004년 8월~현재 가톨릭대학교 컴퓨터공학과 석사과정  
<관심분야> MIMO-OFDM

최 상 호 (Sang-Ho Choe)

정회원



2001년 5월 Texas A&M Univ 박사  
2003년 3월~현재 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 조교수  
<관심분야> MIMO-OFDM, 무선 센서네트워크, Cognitive Radio 등