

H-ARQ 시스템에서 OFDM 서브프레임 재배치를 위한 새로운 기준

*장민호^O, *신범규, *노중선, **김상호, ***신동준
*서울대학교 전기컴퓨터공학부, 뉴미디어통신공동연구소
**성균관대학교 정보통신공학부
***한양대학교 전자통신컴퓨터공학부

A New Criterion for Reordering of OFDM Subframes in H-ARQ Systems

*Min-Ho Jang^O, *Beomkyu Shin, *Jong-Seon No, **Sang-Hyo Kim, and ***Dong-Joon Shin

*Department of EECS, INMC, Seoul National University

**School of ICE, Sungkyunkwan University

***Department of ECE, Hanyang University

*mhjang@ccl.snu.ac.kr, *thechi@ccl.snu.ac.kr, *jsno@snu.ac.kr, **iamshkim@skku.edu, ***djshin@hanyang.ac.kr

요 약

본 논문은 저 밀도 패리티 검사 (low-density parity-check: LDPC) 부호를 사용하여 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 시스템에서 type I 혼합-자동 반복 요구 (hybrid automatic repeat request: H-ARQ)를 위한 서브프레임 (subframe) 재배치의 새로운 기준을 제안한다. 임의의 서브프레임 재배치 패턴에 대하여 채널 용량 (channel capacity)이 클 수록 비트오류율 (bit error rate: BER) 성능도 우수하다는 사실을 검증하고, 이로부터 H-ARQ 시스템에서 패킷의 재전송시에 서브프레임의 재배치 패턴에 따른 BER 성능은 채널 용량을 계산하여 쉽게 예측할 수 있다. 이러한 서브프레임 재배치를 위한 새로운 기준을 적용하여, 각 서브프레임에 대하여 누적 균등 결합 전력 할당을 보장하도록 재전송 패턴을 선택할 경우에 채널 용량이 가장 크게 되어 우수한 성능을 보인다는 사실을 확인할 수 있다. 또한 OFDM 시스템에서 어떤 채널이 매우 느리게 변화할 때, 균등 결합 전력 할당을 위한 서브프레임 재배치 방법은 채널 상태 정보 (channel state information: CSI) 사용 유무와 관계없이 기존의 체이스 결합 방법보다 복잡도의 큰 증가없이 우수한 성능을 보인다.

1. 서론

최근 차세대 이동 통신 시스템의 핵심적인 두 가지 요소 기술로 고속 데이터 전송에 적합한 변조 방식인 직교 주파수 분할 다중화 (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 시스템과 고속 데이터 처리에 요구되는 신뢰도를 보장하기 위한 채널 부호인 저 밀도 패리티 검사 (low-density parity-check: LDPC) 부호 [1]가 많은 주목을 받고 있다. OFDM 시스템은 주파수 선택적 페이딩 (frequency selective fading) 채널에서 많은 장점을 갖는다. 구체적으로, 주파수 선택적 페이딩 채널 환경에서 하나의 탭을 갖는 이퀄라이저 (equalizer)가 사용될 수 있기 때문에, OFDM 시스템은 단일 반송파 (carrier) 변조 방식 시스템과 비교하여 성능이 우수하다 [2]. 1962년 Gallager에 의하여 고안된 LDPC 부호는 다

양한 채널에 대하여 채널 용량에 근접하는 우수한 성능을 보인다. 특히, 블록 형태 LDPC (block-type LDPC: B-LDPC) 부호는 적은 수의 하드웨어 메모리를 사용하여 효율적인 부호화 (encoding)와 복호화 (decoding)를 쉽게 구현할 수 있다. 실제로 LDPC 부호를 사용한 OFDM 시스템은 무선 근거리망 (wireless local area network: WLAN)과 무선 도시권역망 (wireless metropolitan area network: WMAN), 그리고 디지털 비디오 방송 (digital video broadcasting: DVB)과 같이 통신, 방송과 관련된 다양한 분야에서 표준으로 채택되었다.

체이스 결합 (Chase combining) [3]은 type I 혼합-자동 반복 요구 (hybrid automatic repeat request: H-ARQ)를 시스템이 지원하는 경우에 복호를 위하여 적용 가능한 가장 간단한 결합 기법이다. 체이스 결합의 개념은 다음과 같이 간략하게 설명될 수 있다. 수신된 패킷이 복

호에 실패하여 오류가 발생하면, 패킷의 재전송이 요구된다. 수신단은 해당 패킷을 재전송 받아서 첫 번째 전송에서 오류를 포함하고 있던 수신 패킷과 비트 단위로 순서대로 더한다. 결국 복호 과정은 위의 결합 기법을 기반으로 하여 쉽게 수행될 수 있다.

본 논문에서는 하나의 패킷을 고정된 개수의 동일한 크기의 서브프레임 (subframe)으로 나누고, 패킷 전송시 서브프레임의 전송 순서를 채널 용량 (channel capacity)을 이용한 새로운 기준에 의하여 재조정하였을 때의 성능상 이득을 채널 상태 정보 (channel state information: CSI)를 이용할 수 있는 환경과 그렇지 못한 환경으로 구분하여 H-ARQ 시스템에서 검증하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서 H-ARQ 시스템 환경에서의 시스템 모델을 제시한다. 구체적으로, 몇몇 가정들을 바탕으로 채널 모델을 설정할 수 있다. 3장은 CSI를 이용할 수 있는 시스템과 그렇지 못한 시스템 환경에 대하여 서브프레임 재배치 방법을 제안한다. 4장에서는 균등 결합 전력 할당을 보장하도록 서브프레임이 재배치 되었을 경우에 그 성능이 가장 우수하다는 사실을 채널 용량을 이용한 서브프레임 재배치의 새로운 기준에 의하여 규명한다. 5장은 기존의 체이스 결합과 비교하여 제안된 균등 결합 전력 할당을 위한 서브프레임 재배치 방법의 유용성을 모의실험 결과로부터 확인한다. 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 다중경로 페이딩 [4]에 대한 간단한 채널 모델로 two-ray 전파 모델 [5]을 고려한다. 특히 실내 환경에서 무선 근거리망을 사용하는 경우나 보행 환경과 같이 채널 상태가 매우 느리게 변화하는 정적 (static) 채널에 대하여, two-ray 채널 모델을 기반으로 LDPC 부호와 이진 위상천이 키잉 (binary phase-shift keying: BPSK) 변조 방식 혹은 16-QAM 변조 방식을 이용하여 OFDM 시스템 환경에서 패킷 (프레임)을 전송한다. 이때 각각의 LDPC 부호어 (codeword)는 하나의 패킷을 구성한다고 가정한다. 또한 OFDM 시스템에서 별도의 보호 대역 (guard band)은 고려하지 않았으며, 부반송파 (subcarrier)에는 한 패킷내의 각각의 심볼들이 할당된다고 가정한다.

이제 채널의 주파수 선택적 페이딩 특성을 two-ray 전파 모델로 모델링한다면, 채널은 s -번째 심볼, $1 \leq s \leq N_s$,에 대하여 주파수 영역에서 다음 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(s) = 1 + \exp(j\theta) \exp\left(j \frac{d \times 2\pi s}{N_s}\right). \quad (1)$$

여기서 θ 는 $[0, 2\pi)$ 구간에서 균일 분포 (uniform distribution)를 따르고, N_s 와 d 는 각각 심볼과 딥 (deep) 페이딩의 개수를 의미한다. 본 논문에서 모의 실험 결과

는 주로 $d = 1$ 인 단일 딥 페이딩 (single deep fading: SDF)에 대하여 제시되었으며, 다른 $d (= 2 \text{ or } 3)$ 값에서도 유사한 경향성을 보여준다.

3. 서브프레임 재배치 방법

이 장에서는 CSI를 이용할 수 있는 환경과 그렇지 못한 환경으로 구분하여 균등 결합 전력 할당을 위한 서브프레임 재배치 방법을 제안한다. 하지만, H-ARQ 시스템에서 CSI를 활용하기 위해서는 피드백 채널 (feedback channel)을 사용하여 추가적인 오버헤드 (overhead)가 발생하기 때문에 많이 선호되지 않는다. 그러므로 본 논문은 CSI를 지원하지 않는 H-ARQ 시스템에 초점을 맞추어 논의를 전개한다. 이는 모의실험 결과에서 확인할 수 있는 것처럼, H-ARQ를 위한 서브프레임 재배치 방법은 CSI 이용 유무에 관계없이 거의 동일한 성능을 보장하기 때문이다.

A. 채널 상태 정보를 이용하는 방법

채널 추정을 통하여 CSI를 이용할 수 있는 시스템을 고려하자. 첫 번째 전송을 위하여, 채널을 순서대로 동일한 크기의 M 개의 서브프레임으로 나누고 CSI를 이용하여 각 서브프레임의 전력을 계산한다. 그 후 첫 번째 전송에서, 하나의 패킷 내의 M 개의 서브프레임에 대하여 채널 상태가 좋은 서브프레임에 패킷의 메시지 부분을 할당하고, 상대적으로 채널 상태가 좋지 않은 위치에는 패리티 부분을 할당하는 방법으로 패킷 내의 부호어의 위치를 서브프레임 단위로 재배치하여 전송한다.

수신단에서는 재조정된 서브프레임의 순서에 맞추어 복호 과정을 진행한다. 복호가 실패한 패킷에 대해서는 H-ARQ를 이용하여 재전송을 수행한다. 재전송시에도 CSI를 이용하여 각 서브프레임에 대하여 균등 결합 전력 할당을 보장하기 위한 재전송 패턴을 결정하여 전송한다. 복호 후 오류가 발생할 경우, 최대 전송 횟수 4회까지 부호어에 대한 위의 전송 패턴 재배치 방법을 반복적으로 사용한다.

B. 채널 상태 정보를 이용하지 않는 방법

CSI를 이용할 수 없는 환경에서, 재전송 이후에 시스템 성능 개선을 위한 방법을 제안한다. 먼저, 첫 번째 전송은 패킷 내의 서브프레임을 보통때와 같이 순서대로 전송한다. 이렇게 수신받은 패킷에서 오류가 발견되었을 때, 서브프레임 재배치 방법을 적용한다. 서브프레임의 순서를 재배치하는 패턴은 다음과 같이 결정할 수 있다. 사전에 동일한 크기를 갖는 M 개의 서브프레임에 대하여, 주파수 영역에서 채널의 평균 전력을 계산한다. 그 후 첫 번째 전송에서와 동일한 채널에 대하여 각 서브프레임의 누적 평균 전력의 합이 균등하게 되도록 패킷 내의 서브프레임의 순서를 미리 결정한다. 이 과정에서 CSI 정보를 알지 못하기 때문에, 각 서브프레임에 대하여 전력을 평균적인 관점에서 구할

수 있다. 자세한 평균 전력 계산 과정은 4장에서 소개한다. 이렇게 미리 결정된 서브프레임 재배치 패턴을 이용하여 재전송을 수행한다. 수신단에서는 미리 재전송 패턴을 공유하고 있기 때문에 쉽게 복호가 가능하다. 위의 평균 전력 계산 과정은 재전송 중에 채널이 변하지 않도록 매우 느리게 변하는 정적 채널을 가정하였기 때문에 유효하다.

일반적으로 LDPC 부호에서 각 서브프레임의 전력이 비균등 할당되는 상황이 시스템의 성능 열화를 야기하는 원인으로 보이기 때문에, H-ARQ 시스템 환경하의 재전송 과정에서 패킷 내의 각 서브프레임에 대하여 균등 결합 전력 할당을 보장하는 서브프레임 재배치 방법을 제안하였다. 이 방법은 딥 페이딩을 경험하는 서브프레임의 대부분을 제거할 수 있기 때문에, 성능이 개선될 것이라고 예측할 수 있다. 보다 상세한 이유는 4장에서 채널 용량을 이용하여 분석할 수 있다.

복호기는 첫 번째 전송에서 오류가 발생한 패킷에 대하여, 각 서브프레임의 누적 평균 전력이 동일하도록 사전에 정해놓은 패킷 내의 서브프레임의 재전송 패턴에 따라서 재전송을 요구하여 복호 과정을 진행한다. 만일 신뢰도 높은 통신을 위하여 추가적인 세 번째, 네 번째 전송이 필요하다면, 균일한 누적 전력 할당을 위한 서브프레임 재배치 방법을 연속적으로 적용할 수 있다.

4. 채널 용량을 이용한 서브프레임 재배치 기준

이 장에서는 H-ARQ 시스템에서 패킷 전송시 서브프레임의 전송 순서를 동일한 결합 전력 할당을 보장하도록 재배치할 경우에 그 성능이 가장 우수하다는 사실을 채널 용량을 이용한 서브프레임 재배치의 새로운 기준에 의하여 규명한다.

이진 입력 가산 백색 가우시안 잡음 (binary input additive white Gaussian noise: BIAWGN) 채널에서 상호 정보량 (mutual information)은 다음과 같이 계산할 수 있다 [6].

$$I(X; Y) = \iint f(x, y) \log \frac{f(x, y)}{f(x)f(y)} dx dy.$$

여기서 $f(x)$ 와 $f(y)$ 는 각각 확률 변수 X 와 Y 의 확률 밀도 함수를 나타내고, $f(x, y)$ 는 결합 확률 밀도 함수를 의미한다. 또한, 확률 변수 $X = \{x \in \{-1, +1\}\}$ 가 균일 분포를 따를 때 상호 정보량 $I(X; Y)$ 가 최댓값을 갖는다. 그러므로 채널 용량 C 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} C &= \max \{I(X; Y)\} \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(y - \sqrt{E_s})^2}{2\sigma^2}\right) \\ &\quad \times \log \left[1 + \exp\left(-\frac{2\sqrt{E_s}}{\sigma^2}y\right)\right] dy. \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, E_s 와 σ^2 은 각각 심볼의 에너지와 잡음의 분산 (variance)을 나타낸다. H-ARQ를 지원하는 시스템의 재

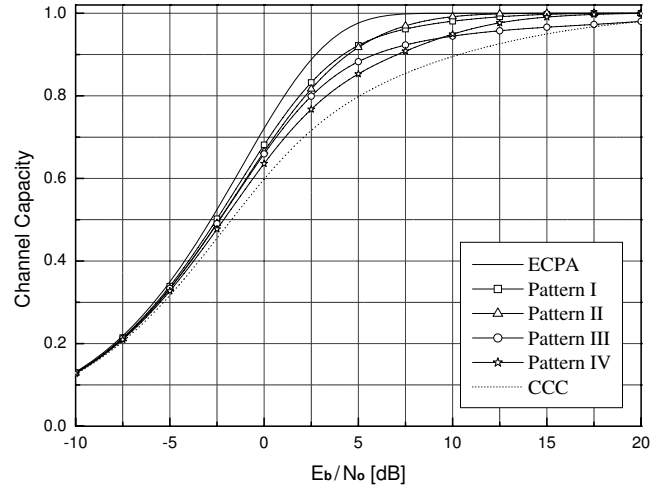


그림 1. 다양한 서브프레임 재배치 패턴에 대한 채널 용량.

전송 과정에서는 $E_s = |h_1(s)|^2 + |h_2(s)|^2$ 이고, $\sigma^2 = (|h_1(s)|^2 + |h_2(s)|^2) \sigma_n^2$ 이다. 이때, h_1 과 h_2 는 각각 첫 번째 전송과 두 번째 전송에서의 채널 특성을 나타낸다.

이제, 재전송시 채널 용량이 최대가 되도록 하기 위하여 한 패킷내의 서브프레임의 전송 순서를 재배치하는 방법을 살펴보자. 이를 위하여 우선 각 서브프레임의 전력을 계산한다. CSI를 이용할 수 없는 시스템에 대해서는 θ 를 알 수 없기 때문에, 수식 (1)을 이용하여 평균 전력 $|h(s)|^2$ 을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$|h(s)|^2 = 2 + 2\cos\left(\theta + \frac{d \times 2\pi s}{N_s}\right). \quad (3)$$

그러므로 각 서브프레임의 평균 전력은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$p_i = \frac{M}{N_s} \int_{\frac{2\pi}{M}i}^{\frac{2\pi}{M}(i+1)} \sum_{s=0}^{N_s/M-1} |h(s)|^2 d\theta. \quad (4)$$

수식 (3)과 (4)로부터, 각 서브프레임의 평균 전력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_i = \frac{M}{N_s} \int_{\frac{2\pi}{M}i}^{\frac{2\pi}{M}(i+1)} \sum_{s=0}^{N_s/M-1} \left[2 + 2\cos\left(\theta + \frac{d \times 2\pi s}{N_s}\right)\right] d\theta.$$

이때 p_i , $0 \leq i \leq M-1$,는 i -번째 서브프레임의 평균 전력을 나타내며, 각 서브프레임은 N_s/M 개의 BPSK 심볼을 포함한다. 위의 전력 계산을 바탕으로, 수식 (2)을 이용하여 재전송시 각 서브프레임 재배치 패턴에 대한 채널 용량을 계산할 수 있다.

그림 1과 2는 각각 H-ARQ 시스템에서 다양한 서브프레임 재배치 패턴에 대한 채널 용량과 비트오류율 (bit error rate: BER) 성능을 도식적으로 보여준다. 이때, 채널은 two-ray 전파 모델에서 $d = 1$ 인 SDF 채널을 고려한다. 또한, 오류 정정을 위하여 사용한 LDPC 부호는 부호 길이 $N_s = 2304$ 이고 거스 (girth)가 6이 되도록 블록 형태로 랜덤 (random)하게 설계한 (3,6) 규칙 (regular) B-LDPC 부호이다. 한 패킷내의 서브프레임의

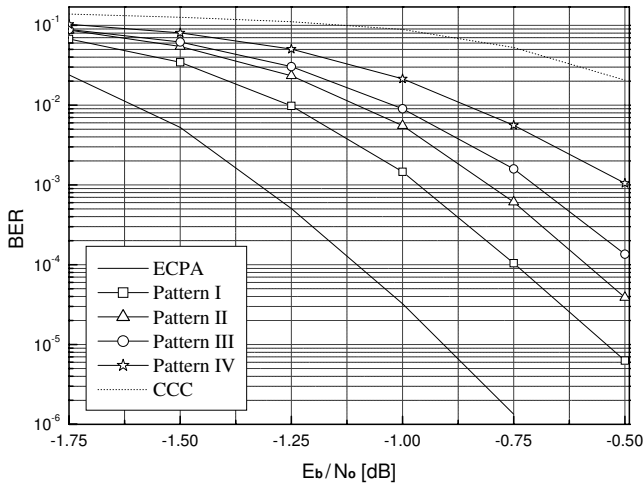


그림 2. 다양한 서브프레임 재배치 패턴에 대한 BER 성능.

개수 $M = 24$ 로 설정하고 BPSK 변조를 사용하여 전송한다. 첫 번째 전송시 서브프레임을 별도의 재배치 없이 그대로 전송 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24)한다. 그러면, 그림 1에서 $[-1.75 \text{ dB}, -0.5 \text{ dB}]$ 사이의 E_b/N_0 구간에서 채널 용량은 균등 결합 전력 할당 (equal combined power allocation: ECPA) 재전송 패턴 (13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12), 재전송 패턴 I (10, 8, 15, 19, 17, 18, 3, 13, 2, 22, 20, 6, 23, 12, 9, 21, 1, 5, 7, 24, 16, 14, 11, 4), 패턴 II (13, 14, 2, 9, 5, 19, 18, 1, 3, 21, 8, 17, 15, 7, 16, 24, 10, 4, 11, 12, 6, 20, 23, 22), 패턴 III (21, 8, 7, 22, 1, 20, 4, 2, 3, 11, 17, 12, 19, 23, 10, 24, 13, 18, 6, 16, 9, 15, 14, 5), 패턴 IV (16, 5, 24, 18, 21, 7, 6, 4, 12, 8, 13, 15, 9, 10, 1, 17, 2, 3, 23, 19, 22, 11, 20, 14), 그리고 기존의 체이스 결합 (conventional Chase combining: CCC) 패턴 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24) 순으로 크기가 결정됨을 알 수 있다. 예상했던 것처럼, BER 성능이 채널 용량의 크기 순서대로 우수함을 그림 2로부터 확인할 수 있다. 다시 말해서, 임의의 재전송 패턴의 채널 용량이 클수록 BER 성능도 우수하다는 경향성을 확인할 수 있다. 그러므로 H-ARQ 시스템에서 패킷의 재전송시에 서브프레임의 재배치 패턴에 따른 BER 성능을 채널 용량을 간단히 계산해 봄으로써 쉽게 예측할 수 있다. 또한, 채널 용량을 통한 분석을 통하여 균등 결합 전력을 할당하는 재전송 패턴의 채널 용량이 가장 큰 값을 갖게 되어 그에 대응하는 BER 성능이 가장 우수하다는 사실을 규명할 수 있다. 유사하게, 두 번의 딥 페이딩 (double deep fading: DDF) 채널과 세 번의 딥 페이딩 (triple deep fading: TDF) 채널에서도 채널 용량과 BER 성능 사이의 상관 관계를 확인할 수 있다.

5. 모의실험 결과

그림 3은 IEEE 802.16e 표준 [7]에 제시된 길이가 2304이고 부호율이 1/2인 B-LDPC 부호에 대하여, 최

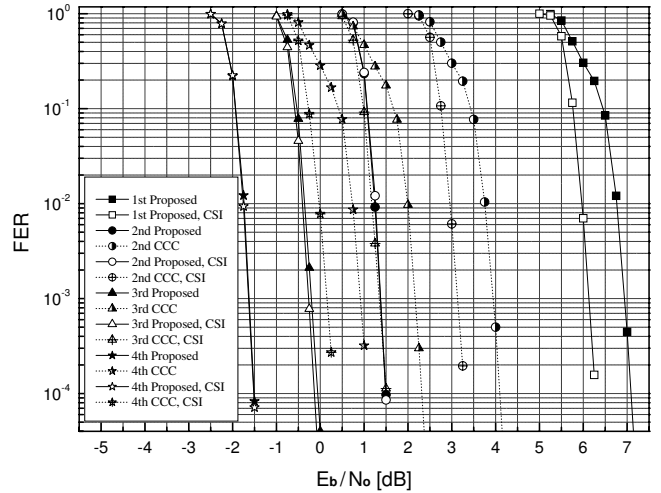


그림 3. 부호 길이가 2304이고 부호율이 1/2인 B-LDPC 부호에 대하여 서브프레임 재배치 방법을 사용하였을 때의 최대 전송 횟수 4회까지의 성능 비교.

대 전송 횟수가 4회로 제한된 H-ARQ를 고려하였을 때의 서브프레임 재배치 방법을 사용하였을 때의 프레임 오류율 (frame error rate: FER) 성능을 비교한다. 여기서 하나의 패킷 내의 서브프레임의 개수 $M = 8$ 이고, 16-QAM 변조를 사용하여 전송한다. 또한, 채널은 수식 (1)에서 주어진 것처럼 $d = 1$ 인 two-ray 모델을 고려한다.

그림 3으로부터, H-ARQ 시스템에서 제안된 균등 결합 전력 할당을 위한 서브프레임 재배치 방법이 CSI를 이용하는 환경과 그렇지 못한 환경에서 모두 기존의 체이스 결합 방법보다 성능이 우수하다. 또한, 첫 번째 전송에서 CSI를 이용하여 서브프레임의 순서를 재배치하여 전송하는 방법이 원래 서브프레임 순서대로 전송 ($\{M_1, M_2, M_3, M_4, P_1, P_2, P_3, P_4\}$)하는 경우보다 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 하지만 CSI를 이용하지 못하는 환경에서도 재전송시 각 서브프레임의 균등 결합 전력을 할당하기 위하여 서브프레임을 재배치 ($\{P_1, P_2, P_3, P_4, M_1, M_2, M_3, M_4\}$)하는 경우에, 그 성능이 CSI를 이용한 방법의 성능과 일치함을 확인할 수 있다. 여기서 M 과 P 는 각각 한 패킷내의 메시지와 패리티 부분을 나타내며, 부호율이 1/2인 LDPC 부호에 대하여 한 패킷내의 8개의 서브프레임은 각각 4개의 서브프레임으로 구성된 메시지와 패리티 부분으로 나눌 수 있다. 세 번째 전송의 경우에는 재전송 후에 주어진 채널의 평균화 효과가 달성되었기 때문에, 홀수 번째 전송에서는 각 서브프레임의 전력을 동일하게 만들 수 없으므로 CSI를 이용한 방법보다 성능이 열화됨을 알 수 있다. 다만 균일 전력을 통한 채널 평균화 효과의 이득이 두 번째 전송이후에 어느 정도 포화되었기 때문에 성능 열화가 첫 번째 전송보다는 크지 않다. 마지막 네 번째 전송에서도 두 방법은 동일한 성능을 보여준다.

그러므로 본 논문에서 제안된 균등 결합 전력을 할당하기 위한 서브프레임 재배치 방법은 CSI 이용 유무에 상

관없이 기존의 체이스 결합 방법과 비교하여 구현 복잡도를 증가시키지 않으면서도 주목할 만한 성능 개선을 보여준다. 또한, 시스템에서 CSI를 이용하지 못하는 환경에서도 제안된 서브프레임 재배치 방법은 복잡도의 증가없이 CSI를 이용한 경우와 거의 동일한 신뢰도로 오류를 복원할 수 있다.

6. 결론

본 논문은 LDPC 부호를 사용하여 OFDM 시스템에서 type I H-ARQ를 위한 서브프레임 재배치 방법을 CSI를 이용할 수 있는 환경과 그렇지 못한 환경에 대하여 각각 제안한다. 이 방법은 각 서브프레임에 대하여 누적 균등 결합 전력 할당을 보장하도록 재전송 패턴을 결정한다. 이렇게 결정된 재전송 패턴에 대한 성능의 우수성을 채널 용량을 이용하여 분석할 수 있다. 그 결과 임의의 재전송 패턴에 대하여 채널 용량이 클수록 BER 성능도 우수하기 때문에, H-ARQ 시스템에서 패킷의 재전송시에 서브프레임의 재배치 패턴에 따른 BER 성능은 채널 용량을 간단히 계산하여 쉽게 예측할 수 있다. 특히, 동일한 결합 전력을 할당하는 재전송 패턴의 채널 용량이 가장 큰 값을 가지므로 그에 대응하는 BER 성능이 가장 우수하다는 사실을 규명할 수 있다.

또한 OFDM 시스템 환경에서 어떤 채널이 매우 느리게 변화할 때, 균등 결합 전력 할당을 위해 제안된 서브프레임 재배치 방법은 채널 상태 정보 사용 유무와 관계없이 기존의 체이스 결합 방법보다 성능이 우수하다. 이때 구현 복잡도도 거의 증가하지 않는 장점을 갖는다. 아울러 CSI를 이용할 수 없는 시스템에서도 H-ARQ를 위한 서브프레임 재배치 방법은 복잡도의 증가없이 CSI를 이용할 수 있는 시스템과 거의 동일한 신뢰도를 유지할 수 있다.

7. 감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2008-F-007-01, 3차원 환경에서의 지능형 무선 통신 시스템]

8. 참고 문헌

- [1] R. G. Gallager, *Low-Density Parity-Check Codes*, Cambridge, MA: MIT Press, 1963.
- [2] R. van Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Norwood, MA: Artech House, 2000.
- [3] D. Chase, "Code combining: A maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, no. 5, pp. 385-393, May 1985.
- [4] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., NJ: Prentice Hall, 2002.
- [5] P. Balaban and V. P. Dewal, "Statistical distribution of parameters in a variable delay two-ray propagation model," in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf.*, Nov. 1989, pp. 59-64.
- [6] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, 2nd ed., NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [7] IEEE 802.16 Working Group, "Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems," *IEEE P802.16e/D8*, May 2005.