

H-ARQ 시스템에서 LDPC 부호의 반복 복호 중단 기법

정회원 신 범 규*, 김 상 호**, 종신회원 노 종 선*, 신 동 준***

New Stopping Criteria for Iterative Decoding of LDPC Codes in H-ARQ Systems

Beomkyu Shin*, Sang-Hyo Kim** *Regular Members*,
Jong-Seon No*, Dong-Joon Shin*** *Lifelong Members*

요 약

반복적인 신뢰 전파 알고리즘을 low-density parity-check(LDPC) 부호에 적용하는 경우 패리티-검사를 이용한 기존 복호 중단 기법은 높은 signal-to-noise ratio(SNR) 영역에서 반복 복호 수를 줄이는 것을 가능케 한다. 그러나 재전송 요청이 빈번한 Hybrid-ARQ(H-ARQ) 시스템에서는 낮은 SNR 영역에 적합한 복호 중단 기법이 없기 때문에 복호에 실패하는 경우 많은 양의 불필요한 반복 복호가 수행된다. 본 논문에서는 결국 복호에 실패하게 될 LDPC 부호 블록들을 복호 초기 단계에서 발견하기 위하여 신뢰 전파 복호에서 임시 부호어의 신드롬 무게를 이용한 중단 기법을 제안한다. 제안된 기법은 H-ARQ 시스템을 위한 LDPC 복호기에서 구현 복잡도의 증가와 성능의 열화 없이도 연산량을 70-80% 감소시킨다.

Key Words : LDPC codes, Stopping criteria, Hybrid-ARQ, Iterative decoding, belief propagation

ABSTRACT

By using inherent stopping criteria of LDPC codes, the average number of iterations can be substantially reduced at high signal to noise ratio (SNR). However, we encounter a problem when hybrid automatic repeat request (H-ARQ) systems are applied. Frequent failures of decoding at low SNR region imply that the decoder reaches the maximum number of iterations frequently and thus the decoding complexity increases. In this paper, we propose a combination of stopping criteria using the syndrome weight of tentative codeword. By numerical analysis, it is shown that the decoding complexity of given H-ARQ system is reduced by 70-80% with the proposed algorithms.

I. 서 론

1993년 Berrou 등은 Shannon의 한계에 근접하는

성능의 터보 부호(turbo code)를 제안하였다^[1]. 이 연구 결과는 실현이 어려운 것으로 여겨졌던 Shannon의 채널 용량(channel capacity)을 실용적

※ 본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부에 의해 추진된 최우수 연구실 지원사업과 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발사업[2008-F-007-01, 3차원 환경에서의 지능형 무선 통신 시스템]의 일환으로 수행되었습니다.

* 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 부호및암호연구실 및 뉴미디어통신공동연구소 ((thechi76.jsno}@snu.ac.ac.kr)

** 성균관대학교 정보통신공학부 통신및부호이론연구실 (iamshkim@skku.edu)

*** 한양대학교 전자컴퓨터통신공학부 부호및통신연구실 (djshin@hanyang.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-05-250, 접수일자 : 2008년 5월 27일, 최종논문접수일자 : 2008년 9월 3일

복잡도로 실현 가능함을 최초로 보임으로써, 뒤를 이은 관련 분야 연구의 기폭제가 되었다. 실제로 터보 부호의 부호는 부호의 길이에 대하여 선형 복잡도를 갖는 알고리즘^[2]을 반복적으로 적용함으로써 실현 가능한 복잡도를 갖는다는 점에서 큰 의의가 있다.

터보 부호의 발견에 영향을 받아 실용적 복잡도의 부호 방식을 가지며 채널 용량에 근접하는 성능을 갖는 low-density parity-check(LDPC) 부호가 개발되었다^[3]. LDPC 부호는 신뢰 전파 알고리즘(belief propagation algorithm)이라는 선형 복잡도의 알고리즘의 반복적인 수행으로 부호가 가능하다. 터보 부호와 LDPC 부호는 탁월한 부호 성능을 인정받아 다양한 무선 통신 표준의 오류정정부호로 채택되었다^{[4][5][6][7]}.

터보 부호나 LDPC 부호의 부호가 실현 가능한 복잡도로 구현될 수 있지만 여전히 높은 계산 복잡도를 필요로 한다. 이에 따라 부호기의 계산 복잡도를 줄이기 위하여 반복 부호 중단 기법(stopping criteria)에 관한 연구들이 진행되어 왔는데, 그 대표적인 예로 교차 엔트로피 중단 기법과 경관정 보조 중단 기법을 들 수 있다^[8].

LDPC 부호의 경우 부호 결과가 유효 부호어에 도달하였을 때, 부호를 중단하는 신드롬 검사 혹은 패리티 검사 중단 기법이 있다^[3]. 신드롬 검사 중단은 신뢰 전파 부호 고유의 중단 기법으로, 부호 성능의 저하 없이 매우 우수한 중단 성능을 보인다. 이는 터보 부호와 비교되는 장점 중 하나다.

지금까지 반복 부호의 중단 기법에 대한 연구는 주로 부호기가 전송된 부호어로 성공적으로 수렴한 경우 불필요한 반복 부호를 막기 위한 것이었다. 때문에 낮은 패킷 오류율을 보이는 높은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio; SNR) 영역이 주요 관심 영역이었고 이러한 영역에서는 효과적인 중단 성능을 달성할 수 있었다.

하지만 이러한 반복 부호 부호가 Hybrid-ARQ(H-ARQ) 전송 기법과 결합되는 경우 새로운 문제가 발생한다. H-ARQ 전송 기법을 사용하는 경우 주어진 변조 부호율이 최대의 효율을 보이는 SNR에서 높은 비율로 재전송이 이루어지게 되는 것이 일반적이다. 즉, 수신기에서는 부호 불가능한 수신 신호에 대해 부호 시도를 하게 되는 경우가 많아진다. 이러한 경우 부호기가 정해진 최대 반복 부호 횟수까지 동작하게 되어 부호기의 계산 복잡도를 상승시킨다. 그러므로 H-ARQ가 적용된 시스템에서

는 결국 부호 실패로 귀결될 낮은 SNR 입력에 대해서 초기에 성공적으로 부호 중지 판정을 내려주는 기법으로 계산 복잡도를 크게 감소시키는 것이 중요하다. 가능한 방법으로 SNR과 같은 채널 관찰 값이나 부호기 입력 매트릭의 통계를 이용한 중단을 가정할 수 있으나, 상용 시스템에서는 채널의 빠른 변화 등의 요인으로 log likelihood ratio(LLR)를 정확하게 계산하기 힘든 경우가 많다.

[9]에서는 신뢰 전파 부호의 특성을 관찰하고, 각 단계의 출력 LLR의 절대값의 합의 수렴여부를 이용한 부호 중단 기법을 제시하였고, 이는 많은 부호 불가능한 프레임을 미리 판정하여 낮은 SNR에서 계산 복잡도를 크게 낮추었다. [10]에서는 위와 독립적으로 출력 LLR의 절대값의 평균의 수렴을 이용한 중단 기법을 제시하였다. 이 방법들은 먼저 다수의 부동점 연산 혹은 많은 비트의 고정점 연산을 요구하므로, 다소 높은 복잡도가 요구된다. 또한, 중단 기법의 성능이 파라미터의 변화나, 채널 변화, LLR 계산 오류 등에 민감한 단점을 갖고 있다.

[11]에서는 [9]의 관찰 및 중단 전략을 참조하여, LDPC 부호 과정에 포함되는 패리티 검사 결과 즉, 출력 LLR의 경관정 벡터의 신드롬 벡터만을 이용한 효과적인 중단 기법을 제시하였다. [11]의 기법은 AWGN 뿐 만 아니라, 레일리 페이딩 채널(Rayleigh fading channel)에 동시에 좋은 중단 성능을 보인다는 큰 의미를 갖는다.

[9]-[11]의 정지 기법들은 실제로 부호 성공이 불가능한 프레임은 미리 판정할 수 있어, 논문에서 고려하는 H-ARQ가 적용된 시스템을 위한 반복 부호 중단 기법으로 사용이 가능하다. 하지만, 현재까지 이러한 중단 기법에 의한 H-ARQ에서의 복잡도 감소 이득이 평가된 바가 없었다. 또한, 상기 기법들은 매우 열악한 채널을 거쳐 부호 시도를 할 필요가 없는 프레임이라 하더라도, 상당한 수의 반복 부호를 거친 후 부호 실패 판정을 하는 문제를 갖는다.

본 논문에서는 [11]에서와 같이 신드롬 벡터의 해밍 무게(Hamming weight)만을 이용하는 효율적인 반복 부호 중단 기법을 제시한다. 제안 기법은 H-ARQ 시스템의 특성 상 많은 부호 실패 및 재전송이 발생할 수 있으므로, 더 열악한 채널을 겪은 프레임일수록 빨리 중단 판정을 하는 것을 목표로 한다. 특히, 제안 기법은 다양한 크기의 LDPC 부호 및 채널에 대하여 공통된 기법을 적용하는 것이 가능하며, 특히 입력 매트릭의 스케일링에 오류가

있는 경우에도 안정적으로 동작한다. 제안 기법은 매우 적은 계산량으로 효과적인 중단 성능을 보이며, 특히 H-ARQ 시스템에서 극적인 복잡도 감소 효과를 얻게 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안하고자 하는 기법의 기준 메트릭과 신뢰 전파 복호에 따른 기준 메트릭의 변화 추이에 대한 관찰이 제시된다. III장에서는 위의 관찰에 기반한 새로운 반복 복호 중단 기법을 제시한다. IV장에서는 제안된 기법의 효용성을 AWGN (additive white Gaussian noise) 채널에서 검증하고 뒤이어 IEEE 802.16e 표준안에 제시되어 있는 H-ARQ 구조에 적용한 결과를 제시하고자 한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 신뢰도 전파 복호와 신드롬 무게의 추이

2.1 신드롬 무게

패리티-검사 행렬 H 를 갖는 LDPC 부호에 대하여 입력 LLR 벡터를 $l=(l_0, l_1, \dots)$ 로 표시하고 신뢰 전파 복호의 i 번째 복호 단계의 경관정 결과를 벡터 d_i 로 표현하면 복호 중간 단계의 신드롬 검사 결과를 다음과 같은 벡터로 나타낼 수 있다.

$$s_i = Hd_i^T \quad (1)$$

이 때 $w(s_i)$ 를 신드롬 s_i 의 해밍 무게라 하면 그 값은 신뢰 전파 복호 과정의 i 번째 반복 복호 후 만족되지 않은 체크 노드의 수를 의미하게 되며, 신뢰 전파 복호의 진행 정도를 평가하는 좋은 척도가 된다. 이 메트릭은 신뢰 전파 복호에 추가적인 계산을 필요로 하지 않으며, [11]에서 제안된 기법의 기준 척도가 된다. 본 논문에서도 이 신드롬 무게를 중단 기법의 척도로 삼는다.

2.2 반복 신뢰 전파 복호에 따른 신드롬 무게의 추이

본 논문에서 제안하는 기법은 최대 복호 횟수에 도달할 때까지 복호를 수행해도 결국 복호에 실패하게 될 부호 블록을 미리 검출하는 것을 목표로 한다. 따라서 가급적 반복 복호 과정의 초반부에 정확하게 복호 실패 여부를 판별해 내는 것이 관건이다.

복호 실패의 안정적인 초기 판별을 위해서는 최대 반복 횟수까지 수행되는 LDPC 부호의 반복 복호 결과 후에도 반드시 복호에 실패하는 경우에 대

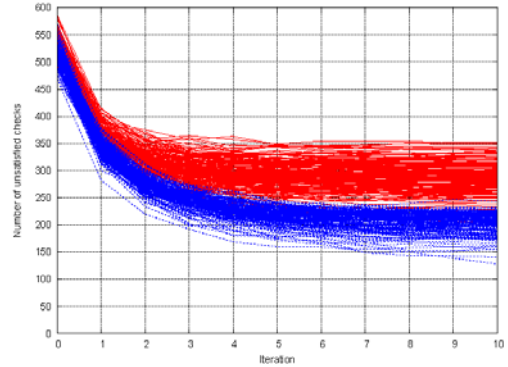


그림 1. 복호 실패하는 경우의 반복 복호 수에 따른 $w(s_i)$ 추이 (IEEE802.16e LDPC 부호, $N=2304$, $R=0.5$, $E_b/N_o = -0.5\text{dB}$ (실선), $E_b/N_o = 0.0\text{dB}$ (점선)).

해 신드롬 무게 $w(s_i)$ 의 추이를 분석해야 한다.

그림 1에서는 AWGN 채널의 낮은 E_b/N_o 영역에서 복호에 실패하는 경우 해당 복호 과정 중의 신드롬 벡터의 해밍 무게 $w(s_i)$, 즉 만족되지 못한 체크 노드의 수를 200 프레임에 대해서만 반복 복호 횟수의 함수로 도시하였다. 초기 수회의 수렴 과정 후에는 대부분의 오류 프레임들의 $w(s_i)$ 가 고정된 값으로 수렴함을 확인할 수 있다. 즉 더 이상 복호를 시도 하더라도 $w(s_i)$ 는 고정된 채 최대 반복 횟수까지 변화가 없게 된다.

비교적 높은 E_b/N_o 의 경우에 이러한 현상은 전체 오류 프레임 중 일부에 지나지 않지만 E_b/N_o 가 낮아질수록 발생 비율이 점점 높아져 일정 수준 이하의 E_b/N_o 에서는 관측된 모든 오류 프레임에서 이러한 현상을 발견할 수 있게 된다.

그림 1에서 오류 프레임의 또 다른 양상을 볼 수 있다. 사용된 LDPC 부호의 거스(girth)에 따라 다르지만 초기 수 회의 반복 복호 과정은 사이클의 존재가 복호 알고리즘에 영향을 주지 않으므로 이상적인 복호기의 동작과 유사하게 복호가 진행됨에 따라 $w(s_i)$ 가 단조 감소한다. $w(s_i)$ 의 변화 추이를 E_b/N_o 의 값과 높은 상관성을 가짐을 알 수 있다.

예를 들어 그림 1에서 초기 3회째의 반복 복호 결과를 보면 $w(s_i)$ 값은 250~300 사이를 기준으로 -0.5dB 에서의 복호 결과와 0.0dB 에서의 결과가 잘 구분됨을 알 수 있다. 이러한 오류 프레임들의 E_b/N_o 의 값을 변화시켜 가면서 비교해 보아도 유사한 양상을 관측할 수 있다. 이 경향을 이용하면, 낮은 E_b/N_o 를 갖는 프레임의 복호 실패를 조기에 판별할 수 있게 된다.

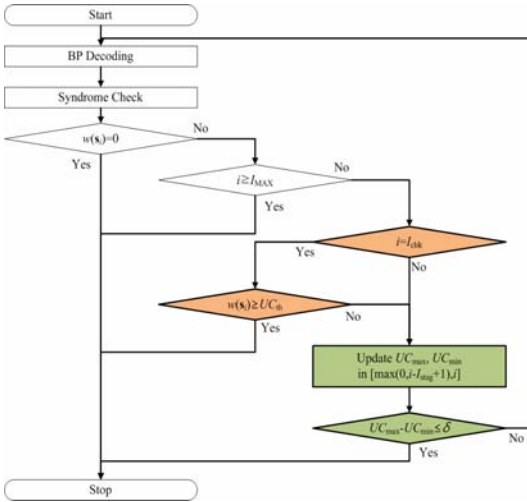


그림 2. 제안된 조기 중단 기법의 순서도

물론 정확한 E_b/N_o 의 추정치가 가능한 경우에는 해당 LDPC 부호의 복호 성능을 고려한 중단 기법을 생각할 수 있다. 하지만, 일반적인 부호화된 OFDM 시스템에서는 각 부반송파마다 각기 다른 채널을 겪게 되고, 시간에 따라 채널 상태가 변하는 페이딩 채널을 겪으며, H-ARQ가 적용되는 경우 결합된 LLR의 상태를 평가해야 하기 때문에, 단순히 E_b/N_o 을 이용하는 중단 기법은 구현이 어렵거나, 다소 심각한 성능 열화를 수반할 것이다.

III. 새로운 조기 중단 기법

본 절에서는 앞 절에서 신뢰 전파 복호에 대한 관찰 결과를 이용하여 조기 중단 기법을 제시한다. 먼저, 복호기의 정제 상태를 검출해서 복호를 조기 중단하는 기법은 다음과 같이 일반화된 형태로 정의할 수 있다. 정제 구간의 길이에 대한 기준 값을 I_{stag} 라 하면 임의의 I_{stag} 구간 동안 매 반복 복호 과정에서의 $w(s_i)$ 의 최댓값과 최솟값의 차이가 정해진 기준 δ 이내이면, 복호를 중단한다. 즉 I_{stag} 구간 내에서 $w(s_i)$ 의 최댓값과 최솟값을 각각 UC_{max} 와 UC_{min} 이라 하면 다음이 성립하는 경우 복호를 중단한다.

$$UC_{max} - UC_{min} \leq \delta$$

오류 프레임 대부분이 $w(s_i)$ 가 주기적으로 변하기 보다는 고정된 값으로 수렴하는 것으로 관측되므로 다음 장에서 일반적인 복호 중지 기법을 완화

```

i ← 0
while (i ≤ maximum number of iteration)
{
    run i-th iteration of BP decoding
    if w(s_i) = 0
        stop decoding
    if i = I_chk
        if w(s_i) > UC_th
            stop decoding
    update UC_max, UC_min in [max(0, i - I_stag + 1), i]
    if UC_max - UC_min ≤ δ
        stop decoding
    i ← i + 1
}
    
```

하여 $\delta = 0$ 인 경우에 대해서만 중단 성능을 살펴보기로 한다. 이는 $UC_{max} = UC_{min}$ 으로 I_{stag} 구간만큼 동일한 값이 유지되는 경우에 해당한다.

오류 프레임의 관측 결과에 의해 제안되는 또 하나의 조기 중단 기법은 다음과 같다. 정제 상태를 검출하기 이전에, 복호 초기 수 회(I_{chk}) 반복이 이루어진 후 $w(s_i)$ 를 점검하여 그 값이 정해진 기준(UC_{th})보다 작으면 복호에 성공할 가능성이 있다고 판단하지만 기준보다 크면 오류 확률이 거의 100%에 달하는 낮은 E_b/N_o 영역으로 판단하여 복호를 중단한다. 이는 아주 낮은 E_b/N_o 를 갖는 수신 블록들의 복호 실패 여부의 조기 판별에 이용한다. 위 두 가지 중단 기법과 신뢰 전파 알고리즘 고유의 중단 기법인 신드롬 검사 기법을 다음과 같이 조합하여 사용한다.

본 논문에서 제안하는 상기의 조합은 복호 과정에서 $w(s_i)$ 만을 관측함으로써 간단하게 구현된다.

IV. 모의 실험 결과

4.1 AWGN 채널의 결과

그림 3과 그림 4는 앞서 설명한 복호 중단 기법을 AWGN 채널에 적용한 모의 실험 결과이다. 궁극적으로는 제안하는 기법을 H-ARQ 시스템에 적용하는 것이 목표이지만 AWGN 채널에서의 동작을 확인해 보는 것도 기법의 효용성을 추량하는데 도움이 될 수 있다. 본 실험에서는 매개 변수 I_{stag} 선택에 따른 frame error rate(FER) 성능 및 연산량의 변화를 비교한다. 모의 실험에 사용된 부호는

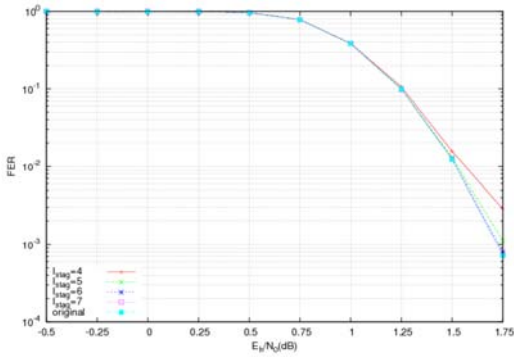


그림 3. 정체 구간의 길이만으로 복호 중단을 판정하는 기법의 FER 성능

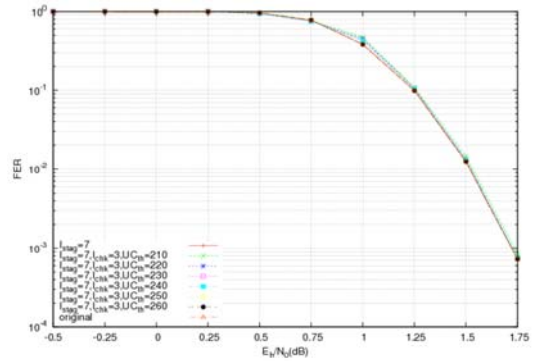


그림 5. 두 기법을 모두 적용한 경우의 FER 성능

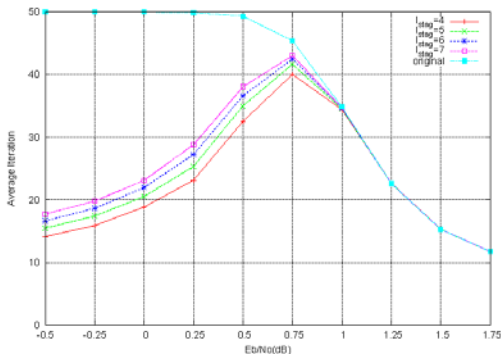


그림 4. 정체 구간의 길이만으로 복호 중단을 판정하는 기법의 평균 반복 복호 횟수

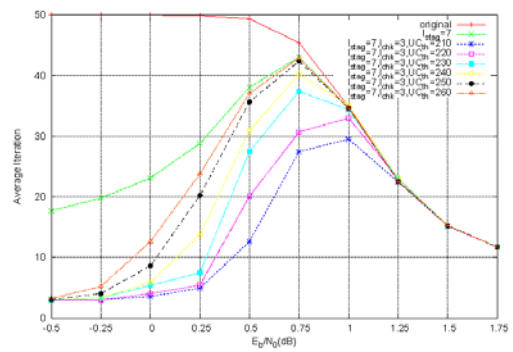


그림 6. 두 기법을 모두 적용한 경우의 평균 반복 복호 횟수

IEEE802.16e의 길이 2304, 부호율 1/2의 LDPC 부호이며, 최대 반복 복호 횟수는 50회로 제한하였다.

실험 결과에 따르면 $I_{\text{tag}} = 7$ 에서 성능 열화 없이도 1.0dB 미만의 구간에서 많은 양의 연산량 감소가 일어났음을 확인할 수 있다. 이러한 연산량의 개선 폭은 최대 반복 복호 횟수의 증가에 따라 커진다.

이렇게 정체 구간만을 이용하여도 오류 프레임을 조기 검출하는 기법은 복호 시 불필요한 연산량을 상당 부분 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 앞 장에서 기술한 바와 같이 정체 구간에 도달하기까지 적게는 수회에서 많게는 십 수회 정도의 감소 구간을 겪어야만 하는 데 이는 그림 4에서 평균 반복 횟수 값이 낮은 SNR에서도 10회 이하로 떨어지기 어려움을 의미한다.

정체 구간을 이용하는 기법에 $w(s_i)$ 의 문턱값을 이용하는 기법을 동시에 적용시킨 성능 결과가 그림 5와 그림 6에 제시되어 있다.

$w(s_i)$ 의 문턱값을 같이 이용하는 경우 그림 5와

그림 6에서 확인할 수 있듯이 성능 열화 없이도 큰 연산량의 감소가 이루어짐을 확인할 수 있고 특히 예측한 바와 같이 아주 낮은 E_b/N_0 영역에서는 I_{ch} 값에 의해 반복 복호로 연산량이 결정됨을 확인할 수 있다.

4.2 H-ARQ 시스템 및 페이딩 채널

LDPC 부호를 사용하는 H-ARQ 시스템에 제안된 기법을 이용하면 큰 폭의 연산량 감소가 달성됨을 보이기 위하여 IEEE802.16e 표준에서 실제 채택된 type-I H-ARQ 전송 방식을 모의 실험에 적용해 보았다. 실험에 사용된 adaptive modulation and coding (AMC) 형식은 표 1에 정리되어 있는데, 이를 통해 제안된 기법이 다양한 부호율 및 서로 다른 형태로 설계된 LDPC 부호에 포괄적으로 적용될 수 있는지 여부를 확인할 수 있다. 사용된 H-ARQ 구조는 부호어 당 최대 4번까지의 전송을 허용하는 것으로 설정하였다. 전송에 사용되는 자원은 288개의 orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)

표 1. AMC 적용 표 (*: A 타입 부호, **: B 타입 부호)

변조	부호길이	부호율	채크노드 수
QPSK	576	1/2	288
		3/4**	144
16QAM	1152	1/2	576
		3/4**	288
64QAM	1728	1/2	864
		2/3*	576
		3/4**	432
		5/6	288

표 2. 복호 조기 중단을 위한 $w(s_i)$ 의 문턱값

변조	부호율	UC_{th} 값 (비율)					
		100%	10%	15%	20%	25%	30%
QPSK	1/2	288	28	43	57	72	86
	3/4**	144	14	21	28	36	43
16QAM	1/2	576	57	86	115	144	172
	3/4**	288	28	43	57	72	86
64QAM	1/2	864	86	129	172	216	259
	2/3*	576	57	86	115	144	172
	3/4**	432	43	64	86	108	129
	5/6	288	28	43	57	72	86

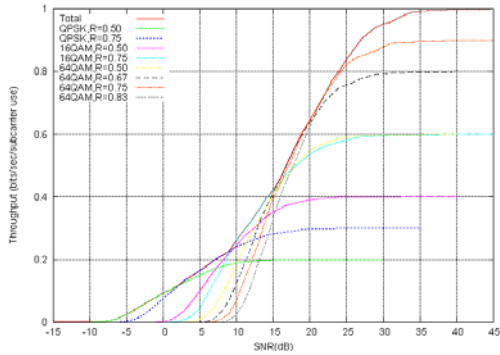


그림 7. IEEE 802.16e의 H-ARQ 적용 시 전송률

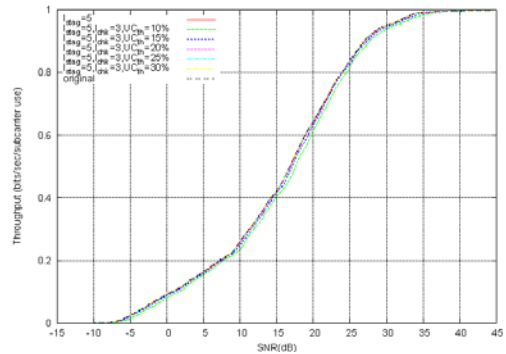


그림 9. 두 기법을 모두 적용한 경우 전송률

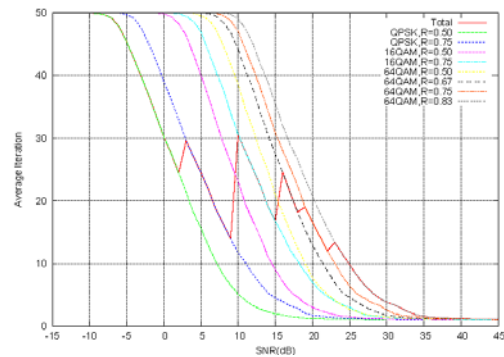


그림 8. IEEE 802.16e의 H-ARQ 적용 시 평균 반복 복호 횟수

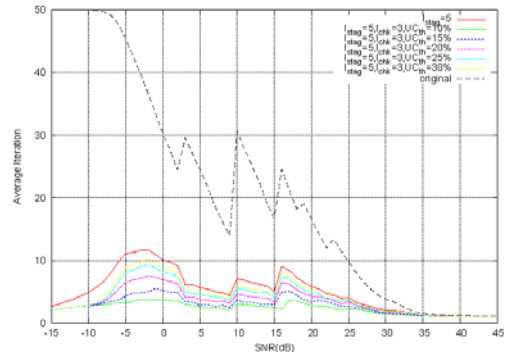


그림 10. 두 기법을 모두 적용한 경우 평균 반복 복호 횟수

부반송파로 설정하였으며 3-경로 독립 페이딩 채널을 가정하였다. LDPC 복호는 최대 반복 복호 횟수 50 번의 신뢰 전과 알고리즘을 사용하였다.

표 1의 전송 구조에 따라 H-ARQ 전송을 하는 경우 그림 7, 그림 8과 같은 전송률과 평균 반복 복호 횟수에 대한 결과를 얻을 수 있다.

이상적인 H-ARQ 스케줄러라면 주어진 SNR에서 최대 전송률을 갖는 AMC 등급을 선택할 것이다. 그림에서 실선은 주어진 SNR에서 최대의 전송률과 이에 해당되는 평균 반복 복호 횟수이다.

제안한 기법의 연산량 감소 효과를 확인하기 위

하여 적당한 매개 변수들을 찾아 보았다. 먼저 정제 구간을 이용한 기법으로부터 전송률 성능의 열화가 거의 없이 연산량을 최소화하기 위한 I_{stag} 값이 5임을 실험적으로 찾을 수 있었다.

다음으로 $w(s_i)$ 의 문턱값을 이용한 중단 기법을 적용하기 위해 적절한 문턱값의 기준을 정하여 실험을 수행해 보았다. 이 때 적용된 문턱값은 표 2에 제시되어 있다. 표에 표시된 백분율은 전체 체크 노드 수를 기준으로 문턱값으로 사용되는 체크 노드 수의 비율을 나타낸다. 이는 표 1에 나와 있는 AMC의 다양한 전송 방식에 대해 동일한 기준을 적용하기 위한 공통된 기준이 된다.

$w(s_i)$ 의 문턱값인 UC_{th} 를 전체 체크 노드 수의 1/4 정도로 설정하면 무시할 만한 성능 열화만으로 LDPC 부호의 복호 연산량의 70-80%를 감소시킬 수 있음이 그림 9와 그림 10을 통해 확인되었다.

V. 결론

신뢰 전파 복호의 신드롬 검사 중단 기법은 높은 SNR 영역에서는 수 회의 반복만으로도 복호를 성공적으로 종료시킨다. 하지만 H-ARQ 시스템에서는 2번 이상의 재전송이 빈번하게 발생하며, 이는 오류 프레임을 최대 반복 복호 횟수까지 불필요하게 동작시켜 의미 없는 연산량의 증가를 야기한다. 본 논문에서는 결국 복호에 실패할 오류 블록을 조기에 안정적으로 발견하기 위한 효율적인 중단 기법을 제시하였다. 제안된 기법은 간단한 비교 연산만을 적용함으로써 구현의 복잡도가 매우 낮으며, type-I H-ARQ 시스템이 적용된 경우에 성능의 열화 없이도 전체 복호 복잡도의 70-80%를 감소시킬 수 있음이 모의실험을 통하여 확인되었다.

참고 문헌

[1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, 1993, pp.1064-1070.

[2] L. Bahl et al., "Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.20, No.2, pp.284-287, 1974.

[3] D. Mackay and R. M. Neal, "Near Shannon limit performance of low density parity check codes," *Elec. Lett.*, Vol.32, No.18, pp.1645-1646, 1996.

[4] IEEE Std. 802.16., "IEEE Standard for local and metropolitan area network part 16: Air interface for fixed and mobile broadband access systems," 2004.

[5] 3GPP, "Technical specification group radio access network multiplexing and channel coding (FDD)," 3GPP TS25.212, 1999.

[6] 3GPP2, "Physical layer standard for cdma2000 spread spectrum systems," Rev. D, C.S0002-D, Feb. 2004.

[7] IEEE Std. 802.11n/D2.00, "Draft IEEE Standard for Local Metropolitan Networks-Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN MAC and PHY Specifications: Enhancements for Higher Throughput," Feb. 2007.

[8] R. Shao, S. Lin, and M. Fossorier, "Two simple stopping criteria for turbo decoding," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.47, No.8, pp.1117-1120, 1999.

[9] F. Kienle and N. When, "Low complexity stopping criterion for LDPC code decoders," in *Proc. IEEE Veh. Tech. Conf. (VTC-2005)*, 2005, pp.606-609.

[10] D. Shin et al., "A stopping criteria for low-density parity-check codes," *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E91-B, No.4, pp.1145-1148, Apr. 2008.

[11] J. Li, X. You, and J. Li, "Early stopping for LDPC decoding: Convergence of mean magnitude (CMM)," *IEEE Commun. Lett.*, Vol.10, No.9, pp.667-669, 2006.

신 범 규 (Beomkyu Shin)

정회원



1999년 2월 서울대학교 전기공학
부 공학사
1999년 3월~2002년 1월 (주)
Locus, 연구원
2002년 1월~2003년 6월 (주) 휴
맥스, 전임 연구원
2004년 3월~현재 서울대학교 전
기·컴퓨터공학부 석사박사통합과정

<관심분야> LDPC 부호, 반복 부호 알고리즘, 통신 시
스템

김 상 호 (Sang-Hyo Kim)

정회원



1998년 2월 서울대학교 전기공
학부 공학사
2000년 2월 서울대학교 전기공
학부 공학석사
2004년 2월 서울대학교 전기공
학부 공학박사
2004년 3월~2006년 7월 삼성전
자, 책임연구원

2006년 8월~2007년 8월 박사 후 연구원 (USC)
2007년 9월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수
<관심분야> LDPC 부호, 시공간 부호, MIMO, 릴레이
통신, 협력 통신

노 종 선 (Jong-Seon No)

중신회원



1981년 2월 서울대학교 전자공학
과 공학사
1984년 2월 서울대학교 대학원
전자공학과 공학석사
1988년 5월 Univ. of Southern
California, 전기공학과 공학박사
1988년 2월~1990년 7월 Hughes
Network Systems, Senior MTS

1990년 9월~1999년 7월 건국대학교 전자공학과 부교수
1999년 8월~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수
<관심분야> 시퀀스, 시공간부호, LDPC 부호, OFDM,
이동통신, 암호학

신 동 준 (Dong-Joon Shin)

중신회원



1990년 2월 서울대학교 전자공학
과 공학사
1991년 12월 Northwestern
Univ., 전기공학과 공학석사
1998년 12월 USC, 전기공학과
공학박사
1999년 1월~1999년 4월 Research
Associate (USC)

1999년 4월~2000년 8월 Hughes Network Systems,
MTS
2000년 9월~현재 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부
부교수
<관심분야> 디지털통신, 이산수학, 시퀀스, 오류정정부
호, 암호학