
가변 LDPC 부호의 성능과 반복횟수 통계

서영동* · 공민한** · 송문규**

Performance and Iteration Number Statistics of Flexible Low Density Parity Check Codes

Young-Dong Seo* · Min-Han Kong** · Moon-Kyou Song**

이 논문은 2006년도 원광대학교 교내 연구비에 의해 연구되었음

요 약

WiMAX 표준인 IEEE 802.16e의 OFDMA 물리계층에서는 채널 환경과 다양한 전송 성능의 요구에 부응하기 위해서 다양한 부호율과 부호 길이를 갖는 총 114가지의 가변 LDPC 부호를 정의하고 있다. 본 논문에서는 AWGN 채널에서 Min-Sum 복호 알고리즘을 사용한 시뮬레이션을 통해 부호율 및 부호 길이에 따른 LDPC 부호들의 성능을 평가한다. 부호율은 감소하고 부호의 길이는 증가할수록 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 특히 각각 동일한 부호율에 대해 2가지의 LDPC 부호가 정의되어 있는 2/3과 3/4의 부호율의 경우는 2/3A와 3/4B이 2/3B와 3/4A보다 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 또한 반복횟수의 통계적 분석을 통한 반복횟수의 확률밀도함수를 통해 복호 복잡도를 파악하고, WER 성능을 추정하였다. 이상의 결과는 LDPC 복호기의 설계에서 부호의 성능과 복호 복잡도 간의 절충을 위해 사용될 수 있다.

ABSTRACT

The OFDMA Physical layer in the WiMAX standard of IEEE 802.16e adopts 114 LDPC codes with various code rates and block sizes as a channel coding scheme to meet varying channel environments and different requirements for transmission performance. In this paper, the performances of the LDPC codes are evaluated according to various code rates and block-lengths through simulation studies using min-sum decoding algorithm in AWGN channels. As the block-length increases and the code rate decreases, the BER performance improves. In the cases with code rates of 2/3 and 3/4, where two different codes are specified for each code rate, the codes with code rates of 2/3A and 3/4B outperform those of 2/3B and 3/4A, respectively. Through the statistical analyses of the number of decoding iterations the decoding complexity and the word error rates of LDPC codes are estimated. The results can be used to trade-off between the performance and the complexity in designs of LDPC decoders.

키워드

block codes, LDPC codes, message-passing, min-sum algorithm

* 원광대학교 제어계측공학과
** 원광대학교 전기전자및정보공학부

I. 서론

LDPC 부호(Low Density Parity Check codes)는 패리티 검사 행렬의 원소가 대부분 0으로 구성되는 선형 블록부호로서 1962년 Gallager에 의해 최초로 제안되었다[1]. LDPC 부호는 Shannon의 성능 한계에 근접하는 뛰어난 성능에도 불구하고 처음 소개될 당시의 하드웨어 기술로는 구현하기 어려운 복잡도로 인해 오랜 기간 동안 잊혀져 있었다. 그러나 LDPC 부호는 1995년 Mackey와 Neal에 의해 재발견된 이후 고품질의 신뢰도를 요구하는 차세대 무선통신 시스템을 위한 채널 부호로 최근에 많은 관심을 받고 있다[2]. 현재 부호화 및 복호화 과정의 하드웨어 구현을 간단하게 하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있고[3,4,5], DVB-S과 IEEE 802.16e 등의 표준에 채택되었으며, IEEE 802.11n, IEEE802.22 등에서 표준화가 진행 중이다.

LDPC 부호는 $m \times n$ 크기의 패리티 검사 행렬 H 에 의해서 정의된다. 여기서 n 은 블록 길이이고, m 은 패리티 검사 행렬 H 에 의해 정의되는 패리티 비트의 수이다. 메시지 길이는 $k = n - m$ 과 같다.

LDPC 부호의 패리티 검사 행렬에서 1의 원소의 수가 매우 적기 때문에 블록 크기가 매우 큰 경우에도 반복 복호를 통하여 복호가 가능하며 블록 크기가 증가할수록 Shannon 성능 한계에 근접하는 성능을 보이게 된다[2].

LDPC 부호의 부호율과 부호 길이는 데이터의 효율적인 전송과 에러정정 능력에 직접적인 영향을 미치므로 중요한 설계 변수이다. 이동 WiMAX 표준인 IEEE 802.16e의 OFDMA PHY에서는 채널 환경에 따른 다양한 전송 성능의 요구에 맞추어 6가지의 부호율 $R=1/2, 2/3A, 2/3B, 3/4A, 3/4B, 5/6$ 및 19가지의 블록 길이 $n=576, 672, 768, 864, 960, 1056, 1152, 1248, 1344, 1440, 1536, 1632, 1728, 1824, 1920, 2016, 2112, 2208, 2304$ 를 선택할 수 있도록 총 114가지의 LDPC 부호를 정의하고 있다. 본 논문에서는 이 LDPC 부호들의 비트오율 성능을 분석한다.

LDPC 부호의 실제 복호기 구현에서 최대 반복횟수는 매우 중요한 설계 변수이다. 이를 너무 작게 설정하면 복호 성능이 저하되고, 반대로 너무 크게 설정하면 복호 지연과 하드웨어의 복잡도가 증가하게 된다. 본 논문에서는 반복횟수의 통계 분석을 이용하여 반복횟수에 따른 복호복잡도를 계산하고, WER (word error rate)

을 추정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

II. LDPC 부호

2.1. 가변 LDPC 부호의 정의

IEEE 802.16e에 정의된 LDPC 부호는 하나 이상의 기본 LDPC 부호 집합에 기반한다. 각각의 기본 부호는 규칙적인 선형 블록부호이다. 기본 부호는 다양한 부호율과 부호길이를 조절할 수 있다. LDPC 부호의 집합에서 각 LDPC 부호는 $m \times n$ 크기의 행렬 패리티 검사 행렬 H 에 의해서 정의되고, 패리티 검사 행렬 H 는 식 (1)과 같다[6].

$$H = \begin{bmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,n_b-2} & P_{0,n_b-1} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & \dots & P_{1,n_b-2} & P_{1,n_b-1} \\ P_{2,0} & P_{2,1} & \dots & P_{2,n_b-2} & P_{2,n_b-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{m_b-1,0} & P_{m_b-1,1} & \dots & P_{m_b-1,n_b-2} & P_{m_b-1,n_b-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $P_{i,j}$ 는 $p(i,j)$ 만큼 회전된 $z_f \times z_f$ 크기의 단위행렬을 나타내며, $p(i,j)=-1$ 의 경우 $P_{i,j}$ 는 $z_f \times z_f$ 크기의 영행렬을 나타낸다. 식 (1)에서 $m_b = m/z_f$, $n_b = n/z_f$ 와 같이 정의되고, z_f 는 표 1과 같이 LDPC 부호의 부호 길이에 의해 정의된다.

표 1. 부호 길이에 따른 z_f

Table. 1 z_f according to the codeword lengths

| | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| n | 576 | 672 | 768 | 864 | 960 | 1056 | 1152 | 1248 | 1344 | 1440 |
| z_f | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 44 | 48 | 52 | 56 | 60 |
| n | 1536 | 1632 | 1728 | 1824 | 1920 | 2016 | 2112 | 2208 | 2304 | |
| z_f | 64 | 68 | 72 | 76 | 80 | 84 | 88 | 92 | 96 | |

LDPC 부호화는 직렬부호화(serial encoding), 병렬부호화(parallel encoding), 행렬치리기법(efficient encoding) 등과 같은 세 가지 방식에 의해 이루어질 수 있다[6].

2.2. 복호 알고리즘

수신기에서 수신된 LDPC 부호는 이분 그래프(bipartite graph)상에서 Min-Sum 알고리즘을 이용해서 복호될 수 있다. Min-Sum 알고리즘을 이용한 복호과정

은 먼저 초기화과정을 거치는데, 식 (2)를 따른다.

$$\bar{L}(q_{ij}) = \bar{L}(c_i) = y_i \quad (2)$$

여기에서 \bar{L} 은 $2/\sigma^2$ 에 의해서 정규화된 LLR(log-likelihood ratios), c_i 는 수신 비트, y_i 는 수신 심볼, q_{ij} 는 i 번째 비트 노드 x_i 로부터 j 번째 체크 노드 f_j 로 전달되는 메시지로써 f_j 를 제외한 모든 체크 노드와 수신 심볼 y_i 로부터 얻은 정보로 구한 $c_i = b(b=0$ 또는 $1)$ 일 확률과 같다.

이후의 과정은 식 (3)과 식 (4)를 이용해서 r_{ji} 와 q_{ij} 를 구하고, 식 (5)를 이용해서 복호 심볼을 결정하기 위한 Q_i 를 구한다.

$$\bar{L}(r_{ji}) = \left(\prod_{i' \in R_{j,i}} \bar{\alpha}_{i'j} \right) \cdot \min_{i' \in R_{j,i}} \bar{\beta}_{i'j} \quad (3)$$

여기에서 $\bar{\alpha}_{ij} \doteq \text{sign}(\bar{L}(q_{ij}))$, $\bar{\beta}_{ij} \doteq |\bar{L}(q_{ij})|$ 와 같고, $R_j \setminus i$ 는 패리티 검사 행렬의 j 번째 행에서 i 번째 열을 제외하고 1이 위치한 열 위치의 집합을 나타내며, r_{ji} 는 j 번째 체크 노드 f_j 로부터 i 번째 비트 노드 x_i 로 전달되는 메시지로써 주어진 비트 $c_i = b$ 이고 다른 비트들이 각각 $\{q_{ij}\}_{j \neq j}$ 에 의해 주어지는 확률분포를 가질 때 j 번째 체크 방정식이 만족될 확률과 같다.

$$\bar{L}(q_{ij}) = \bar{L}(c_i) + \sum_{j' \in G_{i,j}} \bar{L}(r_{ji'}) \quad (4)$$

$$\bar{L}(Q_i) = \bar{L}(c_i) + \sum_{j \in G_i} \bar{L}(r_{ji}) \quad (5)$$

식 (5)에서 구한 Q_i 를 바탕으로 다음과 같이 복호 심볼인 \hat{c}_i 를 결정한다.

$$v_i \quad \hat{c}_i = \begin{cases} 1 & \text{if } \bar{L}(Q_i) < 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

이제 $\hat{c}H^T = \mathbf{0}$ 을 만족하는지 검사하여 복호의 성공 여부를 확인한다. 복호가 성공하였다면 복호화 과정을

마치고, 실패한 경우 식 (3)으로 돌아가서 미리 정해진 최대 반복횟수까지 위의 과정을 반복한다.

III. 성능평가 및 반복횟수의 통계분석

이 장에서는 IEEE 802.16e에 정의되어 있는 6가지의 부호율 ($R=1/2, 2/3A, 2/3B, 3/4A, 3/4B, 5/6$)과 19가지의 부호 길이($n=576, 672, 768, 864, 960, 1056, 1152, 1248, 1344, 1440, 1536, 1632, 1728, 1824, 1920, 2016, 2112, 2208, 2304$)를 갖는 총 114가지의 LDPC 부호의 성능과 반복횟수를 분석한다. 복호 알고리즘은 Min-Sum 알고리즘을 사용하였고, AWGN 채널과 BPSK 변조 방식을 가정하였다. 최대 반복횟수는 200으로 설정하였으며, 각각의 E_b/N_0 에 대해서 복호에러가 100회 이상 발생하거나 10,000개의 부호어를 수신할 때까지 시뮬레이션을 수행하였다. 최대 반복횟수까지 복호과정을 반복해도 복호에 성공하지 못하면 복호에러를 선언한다.

3.1. 성능평가

성능평가를 위해서 표준에 정의되어 있는 모든 LDPC 부호에 대한 시뮬레이션을 수행하여 비트오율 성능 곡선을 구하였다. 그림 1~3은 이 중에서 부호 길이가 가장 짧은 $n=576$, 중간 길이인 $n=1440$, 가장 긴 $n=2304$ 의 경우를 보인 것이다.

부호의 길이에 상관없이 부호율이 1/2, 2/3, 3/4, 5/6의 순서로 비트오율 성능이 우수하다. 동일한 부호율에 대

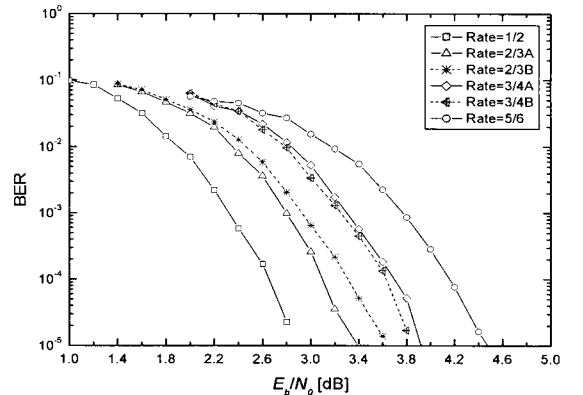


그림1. $n=576$ 인 LDPC부호의 성능
Fig. 1 Performances of LDPC codes with $n=576$

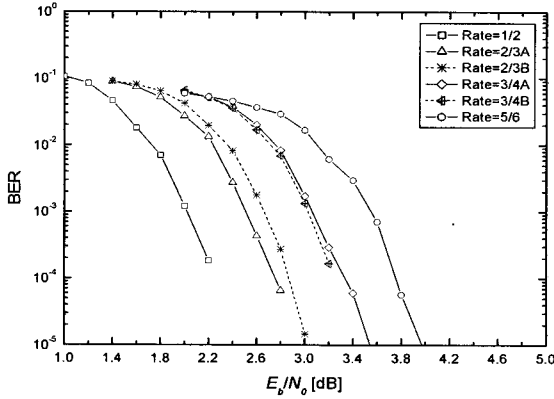


그림 2. $n=1440$ 인 LDPC부호의 성능
Fig. 2 Performances of LDPC codes with $n=1440$

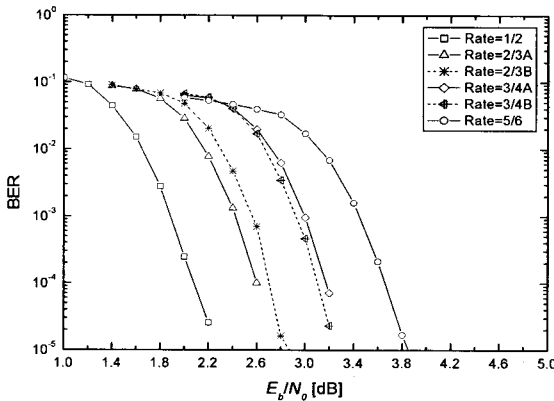


그림 3. $n=2304$ 인 LDPC부호의 성능
Fig. 3 Performances of LDPC codes with $n=2304$

해 2개의 부호를 정의하고 있는 2/3와 3/4의 경우에는 2/3A가 2/3B보다 성능이 우수하고, 3/4B가 3/4A보다 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 동일한 부호율에 대해서 부호 길이가 길어질수록 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

본 논문에서 구한 LDPC 부호의 성능을 문헌 [7]에서 보인 LDPC 부호의 결과와 비교하면, 부호율이 1/2이고 부호 길이가 576인 경우 본 논문에서 보인 LDPC 부호는 10^{-3} 의 비트오율을 기준으로 약 $E_b/N_0 = 2.3\text{dB}$ 가 요구되며, 문헌 [7]의 LDPC 부호는 약 $E_b/N_0 = 2.4\text{dB}$ 가 요구됨을 알 수 있다. 동일한 부호율에 대해서 부호 길이가 2304인 경우 본 논문에서 보인 LDPC 부호는 10^{-3} 의 비트

오율을 기준으로 약 $E_b/N_0 = 1.9\text{dB}$ 가 되며, 문헌 [7]의 LDPC 부호는 약 $E_b/N_0 = 1.6\text{dB}$ 가 요구된다. 이와 같이 본 논문에서 구한 LDPC 부호의 성능 결과는 부호율과 블록길이가 동일할 경우 문헌 [7]에서 구한 성능 결과와 유사하게 얻어졌음을 확인할 수 있다.

3.2. 복호 복잡도 및 반복횟수의 통계분석

LDPC 부호의 복호 복잡도는 이분그래프 상에서 비트노드와 체크노드 간의 연결선의 수 E 와 복호 반복횟수에 비례한다. 공정한 비교를 위해서 메시지 비트 당 복호 복잡도(BC)를 정의하는 것이 합리적이다. 복호 반복횟수는 실제 복호기 설계에서 매우 중요한 역할을 하며, 신호대잡음비에 의존한다.

LDPC 복호 과정에서 복호 후에 2가지의 복호 정지조건이 사용된다. 첫 번째 복호 정지조건은 신드롬 확인에 의존한다. 즉, 복호된 블록이 부호어로 인정되면 복호를 정지한다. 물론 전송된 부호어에 에러에 의해 다른 부호어로 바뀌었을 경우에 이 조건은 반드시 성공적인 복호를 보장하지는 못한다. 두 번째 정지조건은 미리 설정한 최대 반복횟수 I_{MAX} 에 의존한다. 즉, 복호를 반복해도 신드롬 확인에 실패할 경우 무한정 복호를 반복할 수 없으므로, 정해진 최대 반복횟수 I_{MAX} 에 도달하게 되면 비록 유효한 부호어를 얻지 못하였다더라도 복호를 정지하게 된다.

정상 동작영역의 신호대잡음비에서 실제로 수행된 반복횟수는 종종 최대 설정값보다 훨씬 작으므로 다음과 같이 최대설정값 I_{MAX} 과 반복횟수의 평균값 I_{AVE} 를 이용한 2가지의 복호 복잡도를 정의하게 된다[8].

$$BC_1 = \frac{I_{MAX} \cdot E}{k} \tag{7}$$

$$BC_2 = \frac{I_{AVE} \cdot E}{k} \tag{8}$$

복호 반복횟수의 확률밀도함수를 추정하면, 보다 더 정확하게 복호 복잡도를 파악할 수 있다. 그림 4는 (576, 480) 부호의 경우에 $E_b/N_0 = 2.6\text{dB}, 3.2\text{dB}, 3.8\text{dB}, 4.4\text{dB}$ 에서 복호 반복횟수의 확률밀도함수(pdf)를 보인 것이다. 최대 반복횟수는 50으로 설정하고, 반복횟수가 50을 넘어가면 복호실패로 간주하였다. E_b/N_0 가 낮은 경우

대부분의 복호는 실패하고 요구되는 반복횟수는 거의 최대 반복횟수 값 I_{MAX} 와 같아진다. $E_b/N_0 = 2.6\text{dB}$ 의 경우 약 80.7%의 복호에서 I_{MAX} 번의 반복이 필요하였다. E_b/N_0 가 올라갈수록 작은 값의 반복횟수에 대한 빈도가 증가하고 결국 평균 반복횟수 I_{AVE} 값의 감소를 야기한다. 결국 실제 응용에서 관심을 갖는 LDPC 부호의 폭포수 영역인 높은 값의 E_b/N_0 에 대해서 I_{AVE} 의 값은 I_{MAX} 에 비해 훨씬 작다. 이는 복잡도에 영향을 미친다. $E_b/N_0 = 4.4\text{ dB}$ 에서 $BC_1 = 200$ 은 $BC_2 = 10.95$ 보다 18배 이상 큰 값을 갖는다.

이러한 고찰은 LDPC 부호를 복잡도의 관점에서 다른 LDPC 부호나 기타의 부호와 비교할 때 매우 중요한 의미를 갖는다.

그림 4의 확률밀도 함수를 이용하면, 복호기의 최대 반복횟수 I 가 $I_{MAX} = 50$ 이하인 경우에 대해서 WER(word error rate)을 다음과 같이 추정할 수 있다[8].

$$WER_f(E_b/N_0) = \frac{W_\Delta}{W_{TOT}} \quad (9)$$

여기서 W_Δ 는 I 보다 큰 반복횟수를 요구하는 부호어의 개수이고, W_{TOT} 은 시뮬레이션에 사용된 부호어의 총 개수이다.

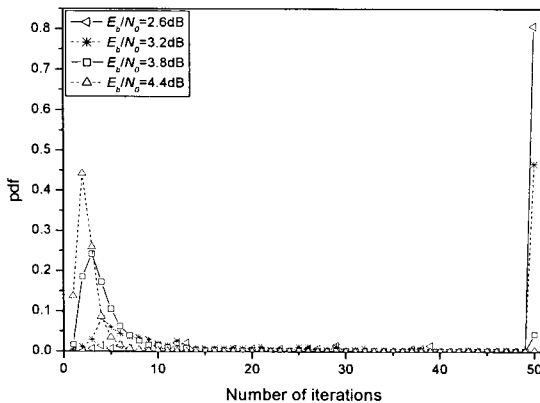


그림 4. (576, 480) 부호에 대한 반복횟수의 pdf
Fig. 4 Pdfs of iteration number for (576, 480) code

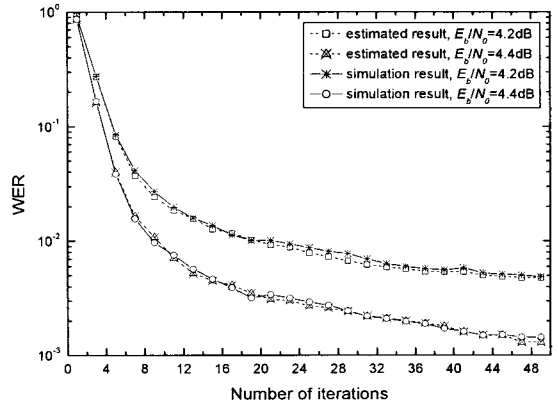


그림 5. WER의 추정값과 시뮬레이션 결과의 비교
Fig. 5 Comparison of estimated values and simulation results for the WERs

그림 5는 $E_b/N_0 = 4.2\text{dB}, 4.4\text{dB}$ 에서 I 의 변화에 따라 추정된 WER과 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 그림 5에서 식 (9)에 의해 추정된 WER은 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다. 식 (7), 반복횟수의 확률밀도함수 그리고 식 (9)를 이용하면 반복횟수에 따른 복호 복잡도와 부호의 성능을 예상할 수 있다. 예를 들어 그림 5에서 $E_b/N_0 = 4.4\text{dB}$ 인 경우 최대 반복횟수 I 가 10회, 40회인 경우 $WER_{10}(4.4\text{dB}) = 8.2 \times 10^{-3}$, $WER_{40}(4.4\text{dB}) = 1.6 \times 10^{-3}$ 으로 약 5배 성능이 개선됨을 알 수 있다. 반면에 I 가 10, 40회인 경우의 복호복잡도는 각각 식 (7)에 의해 $BC_1=40, 160$ 으로 반복횟수 I 에 비례하여 증가한다. 이와 같이 반복횟수의 확률밀도함수, 식 (7), (9)를 이용하여 복호 복잡도와 부호의 성능을 고려한 최대 반복횟수를 선정할 수 있다.

그림 6은 (576, 480)부호를 사용하고 복호과정의 최대 반복횟수를 6, 8, 12, 16, 20, 200회인 경우의 비트오율을 보인 것이다. 최대 반복횟수가 6, 8회의 경우 약 5.0dB에서 10^{-5} 의 비트오율을 달성할 수 있으며, 12, 16, 20회의 경우 약 4.7dB에서 10^{-5} 의 비트오율을 달성함을 확인할 수 있다.

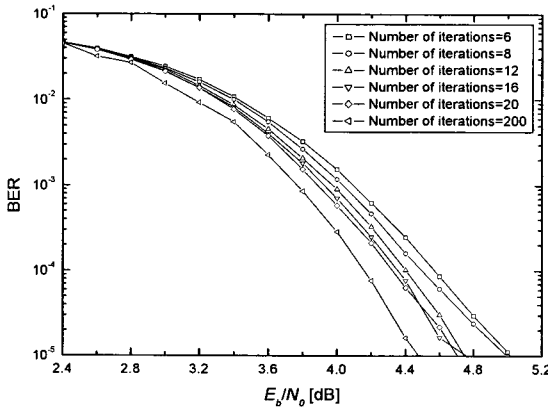


그림 6. 반복횟수에 따른 (576, 480) 부호의 성능
 Fig. 6 Performances of (576, 480) code according to the iteration numbers

이러한 결과는 실제 설계에서 LDPC 부호의 성능과 복잡도에 대한 절충을 위해 사용할 수 있다.

IV. 결론

이동 WiMAX 표준인 IEEE 802.16e의 OFDMA PHY에서는 채널 환경과 다양한 전송 성능의 요구에 부응하기 위해서 6가지의 부호율과 576부터 2304사이의 19가지 부호 길이를 갖는 총 114가지의 LDPC 부호를 선택사항으로 정의하고 있다. 본 논문에서는 AWGN 채널에서 BPSK 변조와 Min-Sum 알고리즘을 사용한 복호를 가정한 시뮬레이션을 통해 부호율 및 부호 길이에 따른 LDPC 부호의 비트오율 성능을 분석하고 반복횟수의 통계 분석을 통하여 최대 반복횟수에 따른 WER을 추정하였다. 또한 최대 반복횟수를 가변시키면서 최대 반복횟수에 따른 부호의 비트오율성능을 비교하였다.

성능분석 결과 부호의 길이에 상관없이 부호율이 1/2, 2/3A, 2/3B 3/4B, 3/4A, 5/6의 순서로 우수한 성능을 보였으며, 부호율이 동일한 경우 부호의 길이가 길수록 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 이러한 성능분석 결과는 전송채널 환경에서 원하는 LDPC 부호의 성능을 얻기 위한 부호율과 부호 길이의 선정에 도움이 되리라 사료된다.

또한 반복횟수의 통계적 분석을 통한 반복횟수의 확률밀도함수를 통해 복호 복잡도를 파악하고, WER 성능

을 추정하였다. 이상의 결과는 실제 복호기 설계에서 LDPC 부호의 성능과 복잡도사이의 절충을 위해서 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes", *IRE Trans. on Inform. Theory*, vol. IT-8, pp. 21-28, Jan. 1962.
- [2] D. J. C. MacKay, R. M. Neal, "Near Shannon limit performance of low-density parity-check codes," *Electron. Lett.*, vol. 33, pp.457-458, Mar. 1997.
- [3] Thomas J. Richardson and R. L. Urbanke, "Efficient Encoding of Low-Density Parity-Check Codes," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 47, pp. 638-656, Feb. 2001.
- [4] Michael Yang, "Design of Efficiently Encodable Moderate-Length High-Rate Irregular LDPC Codes," *IEEE Trans. on commun.*, Vol. 52. pp. 564-571, April. 2004.
- [5] Hocevar D.E, "A reduced complexity decoder architecture via layered decoding of LDPC codes", *IEEE Workshop. on Signal Processing Systems 2004. SIPS 2004*, pp.107-112, 2004.
- [6] IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor1-2005, IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1, Feb. 2006.
- [7] T. Lestable, E. Zimmerman, M.-H. hamon, S. Stiglmayr, "Block-LDPC Codes vs Duo-Binary Turbo-Codes for European Next Generation Wireless Systems", *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*, pp. 1-5, Sept. 2006.
- [8] M. Baldi, G. Bosco, F. Chiaraluce, R. Garelo, "Decoding Complexity and Iteration Number Statistics in Low Density Parity Check Codes", *Proceedings 4th International Symposium on Information and Communication Technology*, pp. 81-86, Jan. 2005.

저자소개



서 영 동(Young-Dong Seo)

2006. 2 원광대학교 전기전자및정보공학부 졸업

2006. 3~현재 원광대학교 제어계측공학과 석사과정

※관심분야: 디지털 통신시스템 설계, 채널부호화



공 민 한(Min-Han Kong)

2001. 2 원광대학교 전기공학부 졸업

2003. 2 원광대학교 제어계측공학과 공학석사

2007. 8 원광대학교 제어계측 공학과 공학박사

2004. 4~현재 원광대학교 전기전자및정보공학부 강의교수

※관심분야: 디지털 통신시스템 설계, 채널부호화



송 문 규(Moon-Kyou Song)

1988. 2 고려대학교 전자공학과 졸업

1990. 2 고려대학교 전자공학과 공학석사

1994. 2 고려대학교 전자공학과 공학박사

1994. 3~현재 원광대학교 전기전자및정보공학부 교수

1999. 9~2000. 8 캐나다 빅토리아 대학교 전기및컴퓨터공학과 방문교수

2006. 2~2007. 2 미국 스탠퍼드 대학교 전기공학과 방문교수

※관심분야: 무선통신, 디지털 통신시스템 설계, 채널부호화