

IEEE 802.16e 표준에 제시된 LDPC 부호의 수렴 속도 개선을 위한 복호 방법

정회원 장 민 호*, 신 범 규*, 박 우 명*, 종신회원 노 종 선*, 정회원 전 인 산**

Decoding Method of LDPC Codes in IEEE 802.16e Standards for Improving the Convergence Speed

Min-Ho Jang*, Beom-Kyu Shin*, Woo-Myoung Park* *Regular Members*,
Jong-Seon No* *Lifelong Member*, In-San Jeon** *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 체크 노드 분할을 이용한 변형된 반복 복호 방법 [8]을 IEEE 802.16e 표준에서 제시된 low-density parity-check(LDPC) 부호에 적용하여 복호의 수렴 속도 개선을 확인한다. 또한 IEEE 802.16e에서 제시된 LDPC 부호에 가장 적합한 체크 노드 분할 방법을 제안한다. 수렴 속도 개선은 반복 횟수를 줄일 수 있다는 의미에서 계산 복잡도를 감소시킬 수 있다. 이러한 체크 노드 분할을 이용한 복호 방법은 복호기의 하드웨어 구현이 병렬 처리 방식으로 구현되기 어려운 시스템에서 효과적인 직렬 처리 방식으로 적용될 수 있다. 제시된 LDPC 부호의 변형된 반복 복호 방법은 무선 통신 시스템 환경의 실제 복호기를 구현하는데 사용될 수 있다.

Key Words : IEEE 802.16e standards, Iterative decoding, Convergence speed, Check node partitioning, Low-density parity-check (LDPC) codes

ABSTRACT

In this paper, the modified iterative decoding algorithm[8] by partitioning check nodes is applied to low-density parity-check(LDPC) codes in IEEE 802.16e standards, which gives us the improvement for convergence speed of decoding. Also, the new method of check node partitioning which is suitable for decoding of the LDPC codes in IEEE 802.16e system is proposed. The improvement of convergence speed in decoding reduces the number of iterations and thus the computational complexity of the decoder. The decoding method by partitioning check nodes can be applied to the LDPC codes whose decoder cannot be implemented in the fully parallel processing as an efficient sequential processing method. The modified iterative decoding method of LDPC codes using the proposed check node partitioning method can be used to implement the practical decoder in the wireless communication systems.

I. 서 론

1960년대에 Gallager [1]에 의하여 제안된 low-

density parity-check(LDPC) 부호는 다양한 채널에 대하여 Shannon의 이론적인 한계에 근접하는 우수한 복호 성능을 보인다. 또한 패리티 검사 행렬의

※ 본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수실험실지원사업과 BK21, 그리고 정보통신부의 출연금으로 수행한 한국전자통신연구원 과제의 연구 결과입니다.

* 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 부호 및 암호연구실 ({mhjang, thechi, ppakoo}@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr)

** 한국전자통신연구원 SoC 설계 연구부 (isjeon@etri.re.kr)

논문번호 : KICS2006-04-162, 접수일자 : 2006년 4월 6일, 최종논문접수일자 : 2006년 12월 1일

저밀도성에 기인한 확률 기반 반복 복호의 구현이 최근 비약적인 하드웨어 기술의 발전에 힘입어 상대적으로 용이해지면서 LDPC 부호는 적어도 지난 십여 년간 오류정정부호 분야의 중요한 연구 주제로 주목받았다. 실제로 LDPC 부호는 통신, 방송, 저장매체 등 다양한 분야에서 표준으로 제안되어 사용되고 있다.

현재 LDPC 부호에 관련된 다양한 연구는 크게 효율적인 부호화가 가능한 부호의 설계 방법과 복잡도 감소를 위한 복호 방법으로 집약될 수 있다. LDPC 부호의 가장 큰 단점이었던 부호화 과정에서 복잡도가 큰 문제점을 해결하려는 노력의 일환으로, 효율적으로 부호화가 가능한 LDPC 부호를 설계하기 위하여 protograph 부호 [2]의 개념을 이용하여 유한 길이를 갖는 블록 형태로 LDPC 부호가 정의되었다. 최근 IEEE 802.16e 시스템 [3]에 채택된 LDPC 부호도 이러한 방식으로 효율적인 부호화가 가능하도록 설계되었다.

대표적인 LDPC 부호의 복호 방법으로 belief propagation(BP) 반복 복호 알고리즘 [4][5]과 min-sum 반복 복호 알고리즘 [6]이 있다. 반복 복호 과정은 Tanner [7] 그래프를 이용하여 도식적으로 이해할 수 있다. 하지만 이러한 복호 방법에서 신뢰할 만한 정보를 복원하기 위해서는 계산 복잡도가 커지게 되므로 구현상 제한 요인이 될 수 있다. 그러므로 복호 과정에서 계산의 복잡도를 감소시킬 수 있다는 의미에서 성능의 수렴 속도를 개선하는 새로운 방법이 필요하다.

본 논문에서는 체크 노드 분할을 이용한 변형된 반복 복호 방법 [8]을 IEEE 802.16e 표준에 제시된 LDPC 부호에 적용하여 성능의 수렴 속도 개선을 확인한다. 또한 IEEE 802.16e 시스템에 제시된 LDPC 부호에 가장 적합한 체크 노드 분할 방법을 제안한다. 이러한 체크 노드 분할을 이용한 복호 방법은 복호기의 하드웨어 구현이 병렬 처리 방식으로 구현되기 어려운 시스템에서 효과적인 직렬 처리 방식으로 적용될 수 있다. LDPC 부호의 변형된 반복 복호 방법은 무선 통신 시스템에서 실제 복호기를 구현하는데 사용될 수 있다.

II. LDPC 부호의 기존 복호 방법들

2.1 BP 반복 복호 방법

반복 복호 방법 [5][6]은 LDPC 부호의 그래프를 구성하는 변수 노드와 체크 노드가 메시지를 반복

적으로 교환하는 일련의 갱신 연산을 통하여 오류를 정정하는 알고리즘이다. 이 과정을 설명하기 전에 널리 사용되고 있는 몇 가지 표기법에 대하여 살펴보자. $M(n)$ 은 변수 노드 n 에 이웃한 체크 노드의 집합을 나타내고, $N(m)$ 은 체크 노드 m 에 이웃한 변수 노드의 집합을 나타낸다. 그리고 $N(m)\setminus n$ 은 $N(m)$ 에서 변수 노드 n 을 제외한 집합을 의미한다. 또한 $q_{n\rightarrow m}(0)$ 과 $q_{n\rightarrow m}(1)$ 은 각각 심볼 n 이 0이거나 1일 확률을 나타내는 변수 (심볼) 노드 n 에서 체크 노드 m 으로의 메시지를 의미한다. 유사하게 $r_{m\rightarrow n}(0)$ 과 $r_{m\rightarrow n}(1)$ 은 각각 심볼 n 이 0이거나 1일 확률을 나타내는 체크 노드 m 에서 변수 노드 n 으로의 메시지를 의미한다. 이 표기법을 바탕으로 LLRs (log-likelihood ratios) 메시지 $Z_{n\rightarrow m}(x_n) = \log(q_{n\rightarrow m}(0)/q_{n\rightarrow m}(1))$ 와 $L_{m\rightarrow n}(x_n) = \log(r_{m\rightarrow n}(0)/r_{m\rightarrow n}(1))$ 을 정의한다. 여기서 송신 부호어와 수신 부호어를 각각 $\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ 와 $\bar{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]$ 로 나타내었다.

BP 반복 복호 방법은 구체적으로 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선 각각의 변수 노드 n 에서 이와 인접한 모든 체크 노드로 LLRs 메시지 $Z_{n\rightarrow m}(x_n) = \log(P(x_n = 0|y_n)/P(x_n = 1|y_n))$ 를 전달한다. 편의상 초기에 변수 노드에 수신된 메시지의 LLRs 값을 사용하였다. 이제 본격적인 반복 복호 과정을 시작한다. 각각의 m 과 $n \in N(m)$ 에 대하여 아래 수식의 체크 노드 갱신 연산을 수행한다.

$$L_{m\rightarrow n}(x_n) = 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{n' \in N(m)\setminus n} \tanh \left(\frac{Z_{n'\rightarrow m}(x_{n'})}{2} \right) \right) \quad (1)$$

연속적으로 각각의 n 에 대하여 아래 수식의 변수 노드 갱신 연산을 수행한다.

$$Z_{n\rightarrow m}(x_n) = \log(P(x_n = 0|y_n)/P(x_n = 1|y_n)) \quad (2) + \sum_{m' \in M(n)\setminus m} L_{m'\rightarrow n}(x_n)$$

수식 (1)과 (2)의 과정을 반복적으로 적용하여 메시지를 교환함으로써 오류를 정정할 수 있게 된다.

2.2 Min-sum 근사화

준 최적 성능에 도달하는 복잡도 감소를 위한 복호 방법의 일환으로 체크 노드 갱신 연산을 단순화시키는데 초점을 맞춘 min-sum 근사화 방법 [6]이 있다. 이 알고리즘은 기본적으로 BP 반복 복호 방법과 그 과정이 거의 동일하다. 유일한 차이는 수식

(1)의 체크 노드 갱신 연산 $L_{m \rightarrow n}(x_n)$ 을 다음과 같이 간단하게 근사화하여 적용한다는 점이다.

$$\tilde{L}_{m \rightarrow n}(x_n) = \left(\prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sign}(Z_{n' \rightarrow m}(x_{n'})) \right) \times \min_{n' \in N(m) \setminus n} |Z_{n' \rightarrow m}(x_{n'})| \quad (3)$$

수식 (1)과 (3)을 비교해 보면, 두 연산은 같은 부호를 가지지만 $\tilde{L}_{m \rightarrow n}$ 의 크기가 $L_{m \rightarrow n}$ 의 크기보다 항상 더 크다는 사실을 알 수 있다. 이를 통하여 보다 정확한 갱신 메시지 값을 얻어내기 위하여 $\tilde{L}_{m \rightarrow n}$ 의 크기를 줄여주는 추가적인 처리 과정이 필요하다라는 것을 알 수 있다. 다음의 두 가지 방법이 체크 노드 갱신 메시지를 개선하기 위하여 채택되었다. 첫 번째 방법은 1보다 작은 정규화 상수 γ 를 사용하여 다음 수식과 같이 체크 노드 갱신을 개선한다.

$$\tilde{L}_{m \rightarrow n}(x_n) = \left(\prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sign}(Z_{n' \rightarrow m}(x_{n'})) \right) \times \gamma \times \min_{n' \in N(m) \setminus n} |Z_{n' \rightarrow m}(x_{n'})| \quad (4)$$

두 번째 방법은 양의 오프셋 상수 β 를 사용하여 다음 수식과 같이 체크 노드 갱신을 개선한다.

$$\tilde{L}_{m \rightarrow n}(x_n) = \left(\prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sign}(Z_{n' \rightarrow m}(x_{n'})) \right) \times \max\{\min_{n' \in N(m) \setminus n} |Z_{n' \rightarrow m}(x_{n'})| - \beta, 0\} \quad (5)$$

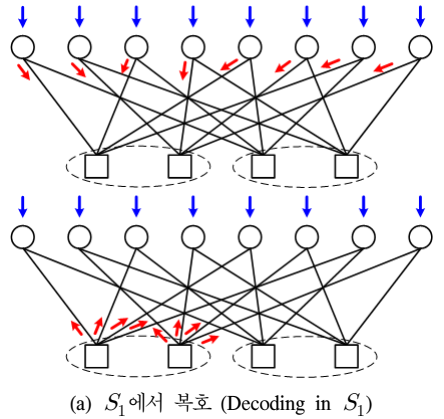
개선된 min-sum 근사화 복호 방법은 수식 (1) 대신에 각각 수식 (4)와 (5)를 이용하여 체크 노드 갱신 연산을 수행하여 메시지를 교환하게 된다. 이때 변수 노드 갱신 연산은 수식 (2)와 같이 BP 반복 복호에서와 동일하게 적용된다.

III. 수렴 속도 개선을 위한 복호 방법

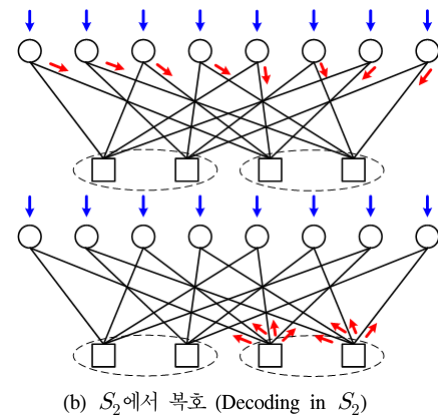
3.1 수렴 속도 개선을 위한 복호 알고리즘

수렴 속도 개선을 위한 변형된 메시지 전달 반복 복호 알고리즘 [8]에 대하여 살펴보자. 기존의 반복 복호 알고리즘에서 각각의 반복은 두 단계로 세분화할 수 있다. 그것은 모든 변수 노드에서 메시지를 갱신하여 각각의 체크 노드로 전달되는 과정과 모든 체크 노드에서 메시지를 갱신하여 각각의 변수 노드로 전달되는 과정으로 이루어진다. 이때 각 과정에서 모든 연산은 동시에 수행된다.

편의를 위하여, 변형된 복호 알고리즘에서 체크 노드가 p 개의 부분 집합으로 분할된다고 가정하자. 그러면 모든 변수 노드에서 첫 번째 부분 집합 내의 체크 노드들로 향하는 메시지들이 갱신되고, 뒤를 이어 첫 번째 부분 집합 내의 체크 노드들에서 이웃한 변수 노드들로 메시지들이 갱신된다. 이 과정이 체크 노드들로 구성되어 있는 첫 번째 부분 집합에 대하여 한 번의 반복에 해당한다. 이제 남아 있는 $p-1$ 개의 체크 노드 부분 집합에 대하여 동일한 과정을 연속적으로 적용한다. 이 과정이 p 개의 부분 집합에 대하여 모두 수행되면 복호의 한 번의 반복이 완료된다. 다시 말해서, 한 번의 반복은 모든 변수 노드들과 체크 노드들로 구성되어 있는 모든 부분 집합들에 대한 직렬 메시지 갱신과 전달을 의미한다. 그러므로 직렬 메시지 전달 복호 알고리즘에서 한 번의 반복에 대한 계산량은 명백히 기존의 복호 알고리즘의 계산량과 동일하다.



(a) S_1 에서 복호 (Decoding in S_1)



(b) S_2 에서 복호 (Decoding in S_2)

그림 1. p 가 2일 때 부호 길이가 8인 (2,4) 규칙 부호의 1회 반복 복호의 과정 (Decoding procedure of a (2,4) regular code with length 8 in one iteration, where $p=2$)

그림 1은 $p=2$ 일 때 부호 길이가 8인 (2, 4) 규칙 부호에 대한 변형된 반복 복호 방법 [8]의 한번의 반복 복호 과정을 보여준다. 여기서 원과 정사각형은 각각 변수 노드와 체크 노드를 나타내며, 각각의 변수 노드 윗부분에 표시한 화살표들은 채널을 통과한 초기 메시지들을 의미한다. 또한 S_i , $1 \leq i \leq p$,는 체크 노드의 i -번째 부분 집합을 나타낸다.

그림 1(b)에서 변수 노드에서 두 번째 부분 집합 내의 체크 노드들로 전달되는 메시지들은 그림 1(a)에서와 같이 이미 첫 번째 체크 노드 부분 집합으로부터 갱신되어 그 변수 노드로 들어오는 메시지들을 이용하여 갱신된다.

3.2 체크 노드 분할 방법

앞서 설명한 복호 알고리즘에서 체크 노드 부분 집합을 어떻게 설정할 지에 따라서 성능의 수렴 속도가 영향을 받는다. 여기서는 복호 시 수렴 속도를 개선하기 위한 효율적인 체크 노드 분할 방법에 대하여 설명한다. 가장 단순한 방법은 체크 노드의 부분 집합들에 속하는 노드의 개수가 모두 동일하도록 체크 노드를 앞에서부터 순차적으로 나누는 것이다. 이를 순차 분할(sequential partitioning)이라고 부른다.

우리는 효율적인 체크 노드 분할 방법으로 비중복 분할(non-repetition partitioning) 방법을 제안한다. LDPC 부호의 패리티 검사 행렬에서 행 치환은 부호 자체의 특성을 바꾸지 않는다. 그러므로 패리티 검사 행렬의 행 순서는 임의로 교환이 가능하다. 이 사실을 이용하여 다음의 체크 노드 부분 집합의 분할 기준에 따라 원래의 부호와 동일한 특성을 갖는 패리티 검사 행렬을 생성할 수 있다. 체크 노드 분할 기준은 행들로 구성된 동일한 체크 노드 부분 집합 내에서, 각각의 열이 한 개 이하의 '1' 성분을 포함하도록 분할하는 것이다. 즉, 어떠한 체크 노드 부분 집합에 속한 선(edge)들에 의하여 연결된 변수 노드들이 그 체크 노드 부분 집합에 두 개 이상 연결되지 않도록 분할하는 방법이다. 이때 각각의 체크 노드 부분 집합 내의 체크 노드의 개수가 동일할 필요는 없으며, 구현의 편의를 위하여 분할 기준을 만족하면서 가능한 적은 수의 체크 노드 부분 집합을 가지도록 설정한다.

이러한 체크 노드 분할 기준을 설정한 이유에 대하여 살펴보자. 동일한 반복 횟수에 대하여, 어떤 체크 노드 부분 집합에 속해있는 체크 노드로부터

변수 노드로 갱신한 메시지는 연속적으로 그 변수 노드에서 다른 부분 집합에 속해있는 체크 노드로 갱신된 메시지를 보내게 된다. 새로운 복호 알고리즘에서 이 갱신된 메시지가 성능의 수렴 속도를 개선하는 요인이라고 할 수 있다. 그러므로 동일한 반복 횟수에 대하여 가능한 많은 갱신 메시지가 LDPC 부호에 대응하는 그래프를 따라서 전파되기 위해서 체크 노드 부분 집합에 속한 선에 의하여 연결된 각각의 변수 노드들이 그 체크 노드 부분 집합에 한 개의 선만 연결 되도록 분할 기준을 설정하는 것이 최적이라는 사실을 알 수 있다.

IV. 모의 실험 결과 및 분석

이 장에서 체크 노드 분할을 이용한 변형된 반복 복호 방법을 IEEE 802.16e 표준 [3]에 제시된 LDPC 부호에 적용하여 성능의 수렴 속도 개선을 확인한다. 모의 실험은 additive white Gaussian noise(AWGN) 채널 환경에서 최대 반복 횟수를 50번으로 제한하여 수행하였다.

그림 2는 IEEE 802.16e 표준에 제시된 부호율 1/2인 LDPC 부호에 대하여 protograph 부호의 개념을 이용하여 블록 형태로 정의된 패리티 검사 행렬을 나타낸다. 이동값이 표기된 각각의 블록은 $z \times z$ 항등 행렬(identity matrix)을 그 값만큼 우순환 이동(circular right shift)시킨 행렬을 의미하고, 빈 블록은 $z \times z$ 영 행렬을 나타낸다. 그러므로 이동값이 0인 각 블록은 $z \times z$ 항등 행렬을 나타낸다. 결국 IEEE 802.16e 표준에 제시된 바와 같이, z 값에 따라 이동값을 재조정하는 규칙을 적용하여 다양한 부호 길이를 갖는 LDPC 부호를 정의할 수 있다.

이상의 LDPC 부호에 체크 노드 부분 집합의 개수가 6인 순차 분할을 적용할 경우, 그림 2의 12×24 행렬에서 (1,2), (3,4), (5,6), (7,8), (9,10), (11,12)-번째 행에 해당하는 모든 체크 노드를 각각

94	73					55	83				7	0														
27				22	79	9				12		0	0													
		24	22	81		33				0		0	0													
61	47						65	25					0	0												
	39				84			41	72					0	0											
			46	40		82				79	0				0	0										
			95	53					14	18						0	0									
11	73				2			47									0	0								
12				83	24	43			51										0	0						
					94	59			70	72											0	0				
		7	65				39	49															0	0		
43					66	41				26	7													0		

그림 2. IEEE 802.16e 표준에 제시된 부호율 1/2인 LDPC 부호의 패리티 검사 행렬 (Parity-check matrix of LDPC codes with rate 1/2 in IEEE 802.16e standards)

의 부분 집합으로 설정하여 순차적으로 새로운 복호 알고리즘을 수행한다. 또한 보다 수렴 속도를 개선하기 위하여 비중복 분할 방법을 적용하여 체크 노드를 나누어보자. 이는 그림 2의 행렬에서 (1,10), (2,11), (3,5), (4,6), (7,9), (8,12)-번째 행에 대응하는 모든 체크 노드를 각각의 부분 집합으로 설정하면 된다.

우선 체크 노드 분할 방법으로 제시한 순차 분할과 비중복 분할을 적용한 새로운 복호 방법의 성능 결과를 비교해 보자. 그림 3은 부호율이 1/2이고 길이가 2304인 LDPC 부호에 대하여 체크 노드 부분 집합의 개수 p 를 1(기존 BP), 2, 6으로 설정하여 순차 분할을 이용한 방법과 비중복 분할을 이용한 방법의 frame error rate (FER) 성능을 보여준다.

순차 분할의 경우 p 가 커질수록 수렴 속도가 개선되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 p 가 커질 경우 latency 문제로 실제적 구현이 어렵다. 그러므로 p

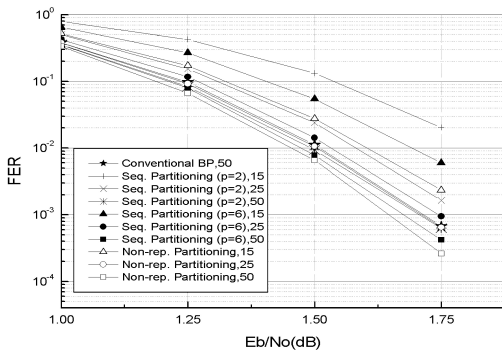


그림 3. 부호율이 1/2이고 길이가 2304인 LDPC 부호에 대한 순차 분할과 비중복 분할 방법을 적용하였을 때, 각 반복 횟수에 따른 FER 성능 (The FER Performance for LDPC codes with rate 1/2 and length 2304 according to iterations applying sequential and non-repetition partitioning)

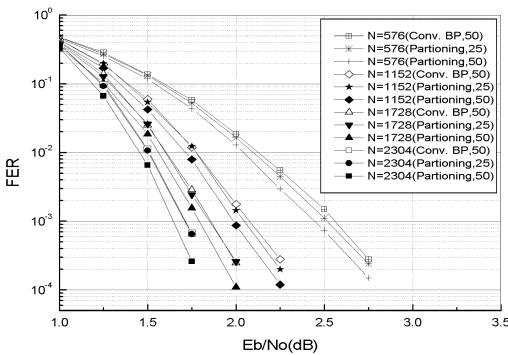


그림 4. 부호율이 1/2인 부호에 체크 노드 분할을 이용한 복호 방법을 적용하였을 때, 각 반복 횟수에 따른 FER 성능 (The FER performance according to iterations applying modified decoding method by partitioning check nodes to rate 1/2 codes)

=1152 (체크 노드의 최대 개수)를 갖는 순차 분할 방법의 성능에 접근하면서도 6개의 체크 노드 부분 집합만을 갖는 비중복 분할 방법이 성능과 구현 측면에서 가장 적합하다.

이제 비중복 분할 방법을 이용하여 체크 노드를 분할한 변형된 복호 알고리즘을 IEEE 802.16e 표준에 제시된 다양한 길이와 부호율을 갖는 LDPC 부호에 적용하여 성능의 수렴 속도 개선을 확인해보자. 이때 BP 알고리즘을 기반으로 하는 수식 (1)의 체크 노드 갱신 연산을 사용한다. 그림 4, 5, 6은 다양한 부호 길이에 대하여 각각 부호율이 1/2, 2/3A, 그리고 3/4A인 LDPC 부호의 FER 성능 결과를 나타낸다. 부호율이 2/3A와 3/4A인 경우, 비중복 분할 방법에 의하여 체크 노드 부분 집합들은 각 부호율에서 블록 형태로 정의된 패리티 검사 행렬의 각각의 행 블록에 대응된다.

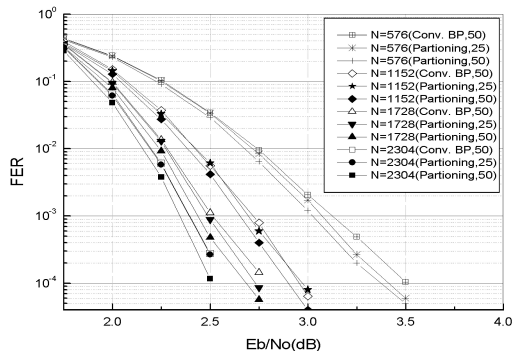


그림 5. 부호율이 2/3인 A부호에 체크 노드 분할을 이용한 복호 방법을 적용하였을 때, 각 반복 횟수에 따른 FER 성능 (The FER performance according to iterations applying modified decoding method by partitioning check nodes to rate 2/3A codes)

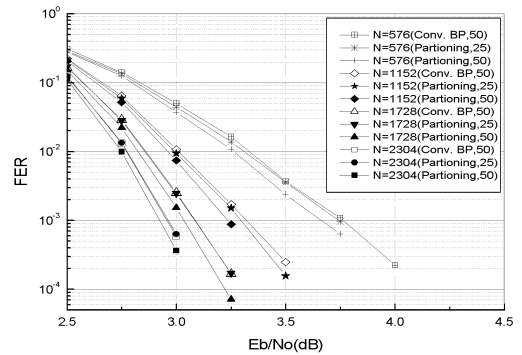


그림 6. 부호율이 3/4인 A부호에 체크 노드 분할을 이용한 복호 방법을 적용하였을 때, 각 반복 횟수에 따른 FER 성능 (The FER performance according to iterations applying modified decoding method by partitioning check nodes to rate 3/4A codes)

표 1. Min-sum 근사화 복호시 최적의 γ 와 β 값 (Optimum values of γ and β in min-sum approximation decoding)

	γ	β
Rate 1/2	0.83	0.43
Rate 2/3(A)	0.82	0.44
Rate 3/4(A)	0.76	0.46

그림 4, 5, 6으로부터 모든 부호율과 길이에 대하여 체크 노드 분할을 이용한 복호 방법의 25회 반복의 성능이 기존 복호 방법의 50회 반복의 성능과 유사함을 확인할 수 있다. 두 방법 모두 한 번의 반복에 복호 연산량이 동일하기 때문에, 동일한 복호 성능을 보장하면서도 연산의 복잡도는 절반 정도 줄어든다는 사실을 알 수 있다.

이상으로 체크 노드 분할을 이용하여 BP 알고리즘을 기반으로 변형된 복호 방법이 LDPC 부호의 수렴 속도를 개선한다는 사실을 확인하였다. 다음으로 min-sum 근사화 알고리즘을 기반으로 하는 수식 (4) 혹은 (5)의 체크 노드 갱신 연산을 사용하여 새로운 복호 방법의 수렴 속도 개선을 확인해 보자. 비교 대상으로 각 부호율에서 min-sum 근사화의 성능 결과를 사용하기 위하여 전수 모의 실험을 통하여 최적의 정규화 상수 γ 와 오프셋 상수 β 를 결정하였다. (표 1)

표 1의 최적의 상수 값 γ 와 β 를 사용한 Min-sum 근사화 복호 방법이 수식 (4) 혹은 (5)의 비교적 단순한 체크 노드 갱신 연산을 이용하여 계산 복잡도를 줄이는 동시에 성능 측면에서도 BP와 비교하여 0.1dB내로 근접함을 확인할 수 있었다. 특히 최적의 γ 와 β 값을 선택한 경우 동일한 부호율과 길이의 LDPC 부호에서 유사한 성능을 보였다.

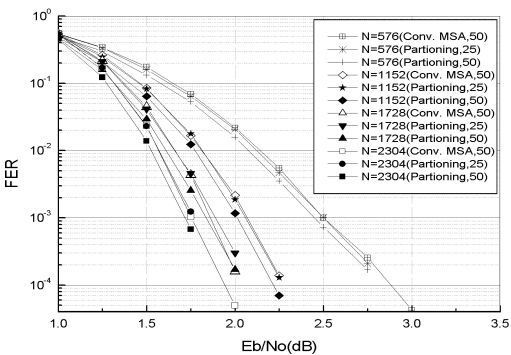


그림 7. 부호율이 1/2인 LDPC 부호에 대하여 최적의 γ 에 의하여 개선된 min-sum 근사화 복호 알고리즘에 체크 노드 분할 방법을 적용했을 때, 각 반복 횟수에 따른 FER 성능 (The FER performance according to iterations applying modified MSA decoding method by partitioning check nodes to rate 1/2 LDPC codes)

이제 최적의 γ 값에 의하여 개선된 min-sum 근사화 복호 알고리즘에 체크 노드 분할을 이용한 변형된 복호 방법을 적용해보자. 이때 체크 노드 분할은 비중복 분할 방법을 이용한다. 그림 7은 부호율이 1/2인 LDPC 부호의 FER 성능을 보여준다.

그림 7에서 최적의 γ 에 의하여 개선된 min-sum 근사화 복호 알고리즘에 체크 노드 분할 방법을 적용한 25회 반복의 FER 성능이 기존 최적의 γ 값에 의한 min-sum 근사화 복호 방법의 50회 반복 성능과 거의 유사함을 확인할 수 있다. 이는 BP 알고리즘에 체크 노드 분할을 적용한 방법과 유사한 수렴 속도 개선의 경향성을 보여준다.

결론적으로 BP 알고리즘과 min-sum 근사화 알고리즘에 공히 비중복 분할 방법으로 체크 노드 분할 복호 방법을 적용하였을 때, 성능의 수렴 속도가 개선됨을 알 수 있다. 그러므로 동일한 복호 성능을 보장하면서도 복호 과정에서 연산의 복잡도를 절반 가량 줄일 수 있는 장점을 갖는다.

V. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.16e 표준에서 제시한 효율적인 부호화가 가능한 LDPC 부호에 대하여, 두 가지 대표적인 LDPC 부호의 복호 알고리즘(BP와 MSA)을 기반으로 체크 노드 분할에 의한 새로운 복호 방법을 적용하여 수렴 속도의 개선을 확인하였다. 그러므로 적은 반복으로 동일한 복호 성능을 보장할 수 있기 때문에, 복호 과정에서 연산의 복잡도를 절반가량 줄일 수 있는 장점을 갖는다. 또한 IEEE 802.16e 시스템에 가장 적합한 체크 노드 분할 방법으로 비중복 분할 방법을 제안하였다. 체크 노드 분할을 이용한 복호 방법은 복호기의 하드웨어 구현이 완전하게 병렬 처리 방식으로 구현되기 어려운 시스템에서 효과적인 직렬 처리 방식으로 고려될 수 있다. 이는 실제 무선 통신 시스템 환경의 복호기를 구현하는데 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] R. G. Gallager, *Low-Density Parity-Check Codes*, Cambridge, MA: MIT Press, 1963.
- [2] J. Thorpe, "Low-density parity-check (LDPC) codes constructed from protograph," *IPN Progress Report*, 42-154, JPL, Aug. 2003.

- [3] IEEE 802.16 Working Group, "Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems," *IEEE P802.16e/D8*, May 2005.
- [4] Frank R. Kschischang, Brendan J. Frey, and Hans-Andrea Loeliger, "Factor graphs and the sum-product algorithm," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 533-547, Feb. 2001.
- [5] T. J. Richardson and R. L. Urbanke, "The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 599-618, Feb. 2001.
- [6] J. Chen, A. Dholakia, E. Eleftheriou, M. P. C. Fossorier, and X. -Y Hu, "Reduced-complexity decoding of LDPC codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 8, pp. 1288-1299, Aug. 2005.
- [7] R. Tanner, "A recursive approach to low complexity codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 27, no. 5, pp. 533-547, Sep. 1981.
- [8] Sunghwan Kim, Min-Ho Jang, Jong-Seon No, Song-Nam Hong, and Dong-Joon Shin, "Sequential message passing decoding of LDPC codes by partitioning check nodes," *submitted to IEEE Trans. Commun.*, Sep. 2004.

장 민 호 (Min-Ho Jang)

정회원



2002년 8월 연세대학교 기계·전자공학부 전기전자공학전공 공학사
 2004년 8월 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 공학석사
 2004년 9월~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사과정

<관심분야> 디지털통신, 오류정정부호, LDPC 부호, OFDM

신 범 규 (Beom-Kyu Shin)

정회원



1999년 2월 서울대학교 전기공학부 공학사
 1999년 2월~2002년 1월 Locus 주식회사 연구원
 2002년 1월~2003년6월 Humax 주식회사 전임 연구원
 2004년 3월~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사박사 통합과정

<관심분야> 오류정정부호, LDPC 부호, Iterative decoding

박 우 명 (Woo-Myoung Park)

준회원



2002년 2월 서울대학교 전기공학부 공학사
 2002년 3월~2003년 12월 한국정보시스템 연구원
 2004년 1월~2005년 2월 Soft i-tech 연구원
 2005년 3월~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사과정

<관심분야> 오류정정부호, LDPC 부호, EXIT chart

노 종 선 (Jong-Seon No)

중신회원



1981년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사
 1984년 2월 서울대학교 대학원 전자공학과 공학석사
 1988년 5월 University 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 전기·컴퓨터공학부 정교수

<관심분야> 오류정정부호, 의사불규칙수열, 암호학, 시공간부호, LDPC 부호, 무선통신시스템, OFDM

전 인 산 (In-San Jeon)

정회원



1984년 2월 국민대학교 전자공학과 공학사
 2000년 8월 충남대학교 대학원 전자공학과 공학석사
 2006년 2월 연세대학교 전기전자공학과 박사수료
 1984년 3월~1990년 1월 국방과학연구소 연구원

1990년 2월~현재 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> VLSI, SoC/ESW, FEC/암호IC Design, 정보통신 SoC