

다중 레벨 LDPC 부호의 설계 및 성능 분석

Design and Performance Evaluation of Multilevel LDPC Codes

이광재 · Yu Yi* · Jia Hou* · 이문호*

Kwang-Jae Lee · Yu Yi* · Jia Hou* · Moon-Ho Lee*

요 약

본 논문에서는 LDPC에 근거한 semi-BICM 기법에 의해 다중 레벨 부호화(MLC)를 설계한다. 기존의 설계와는 다르게 그레이 매핑에 의해 MLC와 BICM을 결합함으로써 서로 다른 부호율(code rate)의 다수의 등가 채널 상에서의 멀티미디어 데이터 전송이 가능하다. AWGN 채널용량에 매우 가까운 SNR에서 양호한 성능을 얻기 위해 랜덤 레귤러 LDPC 부호와 단순한 SA-LDPC 부호를 병렬 독립 복호가 가능한 MLC 부호로서 고찰하였다. 또한, 제안 방식은 멀티미디어 통신 시스템을 위한 전력 및 대역폭 효율을 얻을 수 있음을 수치해석 결과를 이용하여 나타내었다.

Abstract

We design multilevel coding(MLC) with a semi bit-interleaved coded modulation(BICM) scheme based on low density parity check(LDPC) codes. Different from traditional designs, we joint the MLC and BICM together by using the Gray mapping, which can transmit the multimedia data over several equivalent channels with different code rates. To get a good performance from signal-to-noise ratio(SNR) very close to the capacity of the additive white Gaussian noise(AWGN) channel, random regular LDPC code and a simple semi-algebra LDPC(SA-LDPC) code are discussed in MLC with parallel independent decoding(PID). Finally, the numerical results demonstrate that the proposed scheme could achieve both power and bandwidth efficiency for multimedia communication system.

Key words : Multilevel coding, BICM, LDPC, PID

I. 서 론

멀티미디어 시스템은 음성, 데이터, 영상 등의 다양한 정보를 처리하게 된다. 따라서 기존 음성 및 데이터 기반 응용에 비해 방대한 트래픽을 요구한다. 이는 트래픽의 증가를 가져오며, 양방향 인터랙티브 멀티미디어 전송이 요구되는 경우 심각한 문제로 대두된다. 정보량의 증가에 따라, 순시 전송률의 증가가 요구된다. 표 1에 다양한 멀티미디어 서비스에 요구되는 비트율의 추정치를 나타내었으며, 이는 다

중 레벨 또는 다중 전송을 기반의 전송 기법을 요구한다. 따라서, 다중 레벨 부호화는 멀티미디어 통신 시스템을 위한 훌륭한 선택이 될 수 있다. MLC와 BICM은 전력과 대역폭 특성 모두를 만족하는 부호화 변조 기법으로서 잘 알려져 있다. 문헌 [1]에서는 그레이 매핑(Gray mapping)과 각 레벨에 대해 PID를 적용하고 최적의 성분 부호(component code)를 이용함으로써 채널용량에 대한 정보손실을 무시할 수 있는 것으로 결론짓고 있다. 또한, 그레이 매핑 BICM은 채널 용량에 근접하는 상호 정보량을 제공하며,

「이 연구는 전자부품연구원 및 KOSEF R-05-2003-000-10843-0 그리고 IITRC의 부분적인 지원으로 수행되었음.」

한려대학교 멀티미디어 정보통신공학과(Department of Multimedia Information & Telecommunication Engineering, Hanlyo University)

*전북대학교 전자정보공학부(Division of Electronic & Information Engineering, Chonbuk National University)

· 논문 번호 : 20031108-150

· 수정완료일자 : 2004년 1월 5일

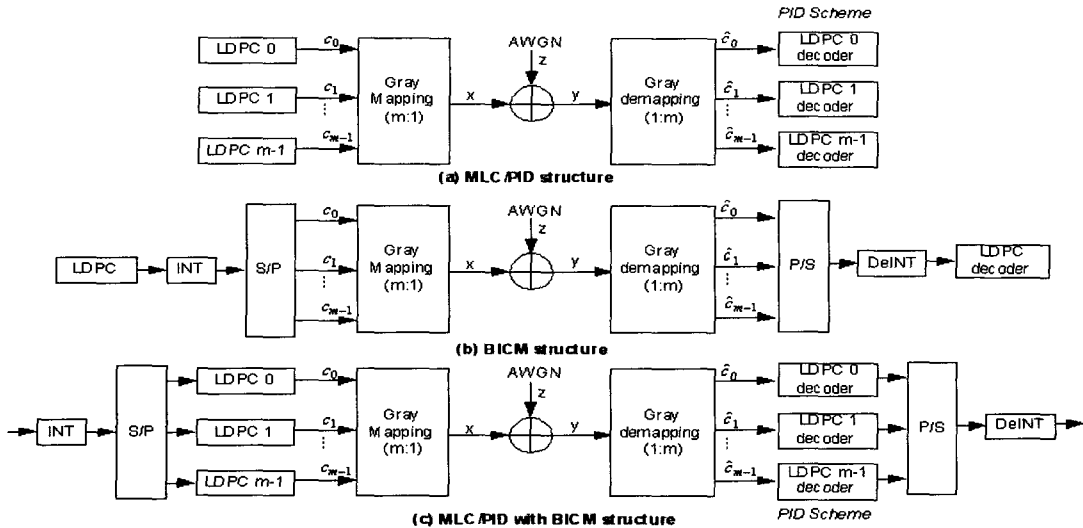


그림 1. LDPC를 이용하는 MLC/PID, BICM, MLC/PID+BICM의 구조
 Fig. 1. Structure of the MLC/PID, BICM and MLC/PID with BICM by using LDPC codes.

단일 이진 부호를 이용하는 MLC/PID 기법의 일종으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 채널용량의 손실 없이 성분 부호의 수를 줄일 수 있는 semi-BICM 기법을 이용하는 MLC를 제안한다. 또한, LDPC 부호는 SNR이 샤논 한계(Shannon limit)에 근접하는 AWGN 채널상에서 매우 낮은 비트 오류율(BER)을 나타내는 것으로 알려져 있다^[3]. 특히, SA-LDPC 부호는 단순한 구성과 우수한 성능으로 인해 많은 관심을 모으고 있다^{[4],[5]}. MLC/PID의 채널용량 기준(criterion)에 의한 최적 부호율에 근거하여 채널 용량에 접근하는 BICM 기법을 이용하는 MLC/PID의 성분 부호로서 랜덤 레귤러 LDPC 부호와 SA-LDPC 부호의 활용을 고찰한다. 수치해석 결과에서 제안 기법은 8 PSK 변조를 이용하는 저속 채널 하나와 고속 채널 두 개를 통해 256 kbps 음성 신호와 약 1 Mbps의 고속 데이터를 낮은 오류율과 낮은 지연 특성을 만족시키며 동시 전송이 가능함을 보여주고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 시스템 모델과 채널용량을 나타낸다. 제 3절에서는 먼저, 제안된 semi-BICM을 이용하는 MLC/PID의 개념을 고찰하며, 제안 기법의 채널용량이 기존의 구성 방법과 동일함을 증명한다. 이어서 SA-LDPC 부호의 구성과 설계 기준을 소개한다. 끝으로, 제안 기법의

성능을 선별된 LDPC 부호를 토대로 시뮬레이션을 통해 평가한다. 제 4절에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델과 채널 용량

그림 1에 LDPC 부호화 MLC 기법과 BICM 기법의 일반적인 구조를 나타내었다. LDPC 부호화 MLC/PID의 경우 각 비트 $c_i, i=0, 1, \dots, m-1$ 는 길이 n , 부호율 $R_i = k_i/n$ 의 다른 이진 LDPC 부호 C_i 에 의해 보호되며, 여기서 k_i 는 비트 단위의 정보어 길이를 나타낸다.

그림 2는 그레이 매핑을 나타내며, 이진 벡터 $c = (c_0, \dots, c_{m-1})$ 를 심벌 포인트 $x \in A$ 에 매핑한다. 여기서 A 는 심벌 집합이며 $|A| = 2^m$ 이다. 이진 등가 AWGN 채널 모델을 고려하고, 채널 잡음과 채널 출력을 각각 z, y 로 표시하기로 한다. 이 기법의 스펙트럼 효율 R_s (bit per symbol)는 각 성분 부호율의 합, 즉 $R_s = \sum_{i=0}^{m-1} R_i$ 와 같다. BICM의 경우, 일반적으로 단지 하나만의 부호기를 필요로 한다. MLC/PID 기법과 결합시키는 경우, 문헌 [6]에서는 LDPC 부호와 MLC/PID 그리고 BICM을 결합하여 m 개의 LDPC 성분 부호를 이용하는 방법을 제안하고 있다. BICM 기법의 채널용량은 MLC/PID에 의해 얻을 수 있는

성능 한계와 동일하다^{[1][2][6]}. PID 모델에서 $C_i, i=0, \dots, m-1$ 은 서로 독립이므로 다음과 같이 쓸 수 있으며,

$$\sum_{i=0}^{m-1} I(Y, C_i) \leq I(Y, C_i | C_0, \dots, C_{i-1}) \quad (1)$$

레벨 i 에서 임의의 낮은 오류율로 전송하기 위한 최대 개별 전송율의 상한은 다음과 같다.

$$R_i \leq I(Y, C_i), \quad i=0, 1, \dots, m-1 \quad (2)$$

따라서, 전체 전송률 $R_s = C$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} R_s &= \sum_{i=0}^{m-1} R_i \leq \sum_{i=0}^{m-1} I(Y, C_i) \leq \sum_{i=0}^{m-1} I(Y, C_i | C_0, \dots, C_{i-1}) \\ &= I(Y, C_0, \dots, C_{i-1}) = C \end{aligned} \quad (3)$$

본 논문에서 고려하는 AWGN 채널의 특성은 다음과 같은 천이 확률 밀도함수 $p(y_k | x_k)$ 로 나타낼 수 있다.

$$p(y_k | x_k) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{d_{x,y}^2}{\sigma^2}\right), \quad (4)$$

여기서, $d_{x,y}$ 는 복소 신호 x_k 와 y_k 간의 유클리드안 (Euclidean) 거리를 나타내며, σ^2 은 평균 0인 복소 Gaussian 잡음의 분산이다. 문헌 [6]과 [7]에서 독립 PID 부채널의 용량은 다음과 같이 주어지며,

$$R_i = 1 - E_{c,y} \left[\log_2 \frac{\sum_{a \in A} p(y|a)}{\sum_{a \in A_i, c_i} p(y|a)} \right], \quad (5)$$

R_s 에 근거한 전체용량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_s &= \sum_{i=0}^{m-1} R_i = m - \sum_{i=0}^{m-1} E_{c,y} \left[\log_2 \frac{\sum_{a \in A} p(y|a)}{\sum_{a \in A_i, c_i} p(y|a)} \right] \\ &= m - \sum_{i=0}^{m-1} E_{c,y} \left[\log_2 \frac{\sum_{a \in A} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{a \in A_i, c_i} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right)} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $E_{c,y}$ 는 c 와 y 에 대한 기대치를, A, c_i 는 위치 i 에서 $c_i \in \{0, 1\}$ 의 값을 레이블(label)로 갖는

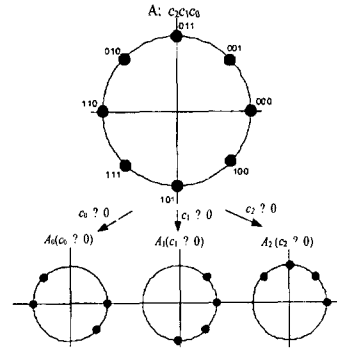


그림 2. 8 PSK의 그레이 매핑
Fig. 2. 8 PSK Gray mapping.

모든 심벌 $a \in A$ 의 부집합(subset)을 나타낸다. 그림 3은 AWGN 채널에서 그레이 매핑 8 PSK 변조에 의한 채널용량을 나타낸다^{[1][6]}. $I(Y, C_1) = I(Y, C_2)$ 에 주목하면, 그림 2에 나타난 c_1 과 c_2 에 대한 그레이 레이블링(labeling)은 단지 90° 회전된 것만큼의 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서,

$$\sum_{a \in A_1, c_1} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right) = \sum_{a \in A_2, c_2} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

그리고, $R_1 = R_2$ 가 된다.

채널 용량 결과에 따르면, PID 기법에 대한 $R_s=2$ bits/symbol에서의 개별 부호율 분포는 $R_0 / R_1 / R_2 = 0.510/0.745/0.745$ 가 된다^{[1][6]}. 따라서, 부호율 0.5105의 낮은 부호율을 갖는 성분 부호는 전송 저속 멀티

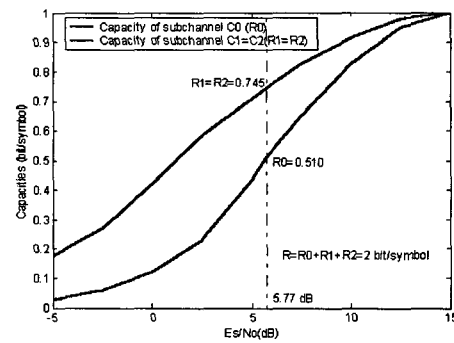


그림 3. 그레이 매핑 8 PSK MLC/PID 기법의 등가 부채널의 용량(AWGN)

Fig. 3. Capacities of the equivalent subchannels of an MLC/PID scheme based on 8 PSK with Gray mapping(AWGN).

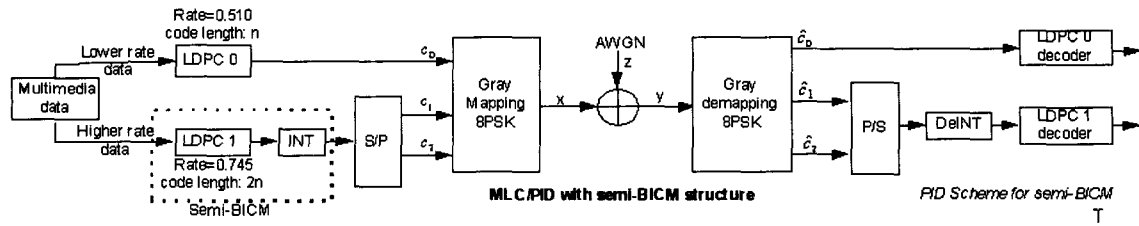


그림 4. LDPC를 이용하는 semi-BICM 8 PSK MLC/PID의 구조
 Fig. 4. Structure of the MLC/PID with semi-BICM by using LDPC Codes for 8 PSK modulation.

표 1. 멀티미디어 서비스의 일반적 전송속도
 Table 1. Typical bit rates for multimedia services.

	서비스 유형	전송율 (Bit Rate)
Voice/Audio	CBR, low delay	8~255 kbps
Digital Data	ABR/UBR, low error	0.1~1.0 Mbps
Video Telephony (H.261)	CBR, low error	64~384 kbps
Video (MPEG1/MPEG2)	CBR/VBR, low delay	1.5~6 Mbps

미디어 데이터 전송에, 부호율 0.745를 갖는 나머지 두 개의 높은 부호율의 성분 부호는 고속 멀티미디어 데이터를 8 PSK 변조의 MLC/PID에서 동시에 전송할 수 있다.

III. LDPC 부호에 의한 semi-BICM MLC/PID 기법

이하에서는 문헌 [6]의 BICM 기법을 이용하는 MLC/PID로부터 채널용량의 손실 없이 성분 부호의 수를 줄일 수 있는 semi-BICM 기법을 이용하는 MLC/PID를 제안한다.

본 논문에서는 semi-BICM을 이용하는 8 PSK MLC/PID 기법을 예로 하여, 이의 블럭도를 그림 4에 나타내었다. 제안 semi-BICM에서는 기존의 MLC 구성에 비해, 길이 n의 LDPC 부호기 두 개를 동일한 부호율 R=0.745를 갖는 부호 길이 2n의 LDPC 부호기로 대체하고 있는 것이 큰 차이점이다. 또한, 두 개의 등가 채널 용량을 얻기 위해 일반적인 BICM 구성과 마찬가지로 채널 부호기 다음에 인터리버(interleaver)를 두고 있다^[2]. 이러한 방법으로 다음과

같은 장점을 얻을 수 있다. 첫째, 동일 부호율의 긴 이진 부호기를 이용할 수 있으며, 이러한 방법으로 성능 개선이 쉽게 얻어진다. 둘째, 성분 부호의 수를 줄일 수 있으며, 단순하고 빠른 복호가 가능하다.

제안 기법의 8 PSK 변조를 위한 채널 용량은 문헌 [2]와 [8]의 BICM으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$C_B = E_{c,y} \left[2 - \log_2 \left(\frac{\sum_{a \in A} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right)}{\prod_{i=1}^2 \sum_{a \in A_i, c_i} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right)} \right) \right] \quad (8)$$

여기서, BICM을 위한 두 개의 등가 채널이 이용된다. 또한, 식 (5)에 나타낸 것처럼 나머지 한 채널은 MLC/PID에 관련되며, 이의 채널용량은 다음과 같다.

$$C' = R_0 = 1 - E_{c,y} \left[\log_2 \frac{\sum_{a \in A} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{a \in A_0, c_0} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right)} \right] \quad (9)$$

따라서 제안 기법의 전체 채널용량은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{proposed} = C_B + C' + R_0 + R_1 + R_2 = E_{c,y} \left[3 - \log_2 \left(\frac{\left(\sum_{a \in A} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right) \right)^3}{\prod_{i=0}^2 \sum_{a \in A_i, c_i} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right)} \right) \right] = 3 - \sum_{i=0}^2 E_{c,y} \left[\log_2 \frac{\sum_{a \in A} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{a \in A_i, c_i} \exp\left(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2}\right)} \right] \quad (10)$$

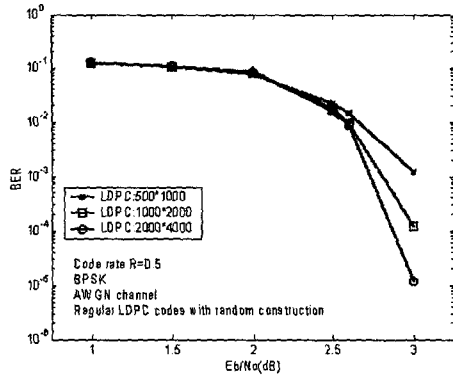


그림 5. $r=3$ 인 레귤러 LDPC 부호와 행렬 크기
Fig. 5. Regular LDPC codes with $r=3$ and matrix sizes.

식 (10)의 결과는 식 (6)으로 주어진 BICM을 이용하는 MLC/PID의 채널용량과 동일함을 알 수 있다. 일반적으로, 제안 기법은 부호길이가 긴 부호기를 이용함으로써 LDPC의 저밀도 특성에 따른 오류 정정 성능에서의 장점을 얻을 수 있다.

그림 5에 나타난 시뮬레이션 결과로부터, BPSK AWGN 채널에서 작은 LDPC 부호를 이용하는 것에 비해 두 배 크기의 LDPC 부호를 이용한 경우 대략 0.2 dB의 성능 개선을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3-1 SA-LDPC의 구성

MPLC/PID 기법의 LDPC 성분 부호의 최적화를 위해 SA-LDPC라는 새로운 부호 구성을 고찰한다. 문헌 [9]에서, 레귤러 LDPC 부호를 반 대수 특성에 근거하여 irregular 부호로 확장하는 간단한 방법을 소개하였다. 이러한 개념에 근거하여 단순한 부호화 구조와 우수한 특성을 실현할 수 있다^[5]. 문헌 [9]의 quasi-random 행렬 패턴의 기술을 위한 표기법을 이용하면, 두 개의 부행렬을 포함하는 패리티 검사행렬 $H = [H^P | H^D]$ 를 생성할 수 있다. H^P 는 $M \times M$ 행렬이며,

$$H^P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서, n 은 부호길이, M 은 패리티 검사 비트의 길이를 나타낸다. 패리티 검사 행렬은 부호어 벡터

u 의 패리티 벡터 u^p 및 정보벡터 u^d 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$H^P u^p = H^D u^d \quad (12)$$

주어진 임의의 정보 벡터에 대해 프로젝션(projection) 벡터 v 를 이용하면 부호어를 생성할 수 있다.

$$H^P u^p = v = H^D u^d \quad (13)$$

특히, $[H^P]^{-1} = U^P$ 이며, 여기서 U^P 는 상 삼각 행렬(upper triangular matrix)이므로,

$$u^p = U^P v \quad (14)$$

이며, 먼저 v 를 구한 후 이를 변환하여 u^p 를 구할 수 있다.

이하에서는, 대수 이론에 근거하여 H^D 를 구하는 절차에 대하여 고찰한다. H^D 는 $t \times t$ 행렬로 분할할 수 있으며, t 는 소수(prime number)이다. $l \times t$ 길이의 $(r, l) - H^D$ 행렬(r 은 열의 무게, l 은 행의 무게)은 다음의 3 단계를 거쳐 구성할 수 있다^[4].

제 1 단계 :

패리티 검사 행렬의 r 번째 행 블록과 l 번째 열 블록에 위치하는 $l \times l$ 항등 행렬(identity matrix)의 각 행을 $i \bmod t$ 만큼 오른쪽 시프트 시켜 얻어진 부행렬을 $B_{r,i}^l$, $i \in S = \{0, 1, \dots, t-1\}$ 라 하자.

제 2 단계 :

$q^l \equiv 1 \pmod{t}$ 를 만족하는 q 가 존재하면, S 는 다수의 집합 L 로 분할되며, 정수 s 를 포함하는 하나의 집합은 $\{s, sq, sq^2, \dots, sq^{m_s-1}\}$ 이며, 여기서 m_s 는 $sq^{m_s} \equiv s \pmod{t}$ 를 만족하는 최소의 양의 정수이다.

제 3 단계 :

H^D 에서 1의 위치는 집합 L_1, \dots, L_r 과 파라미터 t 를 이용하여 결정할 수 있다.

예를 들어, $j = 3, l = 5, t = 31$ 인 경우의 반집합 대수 LDPC 부호를 설계에서는, $q^l \equiv 1 \pmod{t}$ 에 따라 $q = 2$ 가 되며, 패리티 검사 행렬은

$$H = [H_{93 \times 93}^P | H_{93 \times 155}^D], \text{ code rate} = \frac{n-M}{n} = 0.625 \text{ 가}$$

표 2. 집합 L_i 의 분포

Table 2. Distribution of sets L_i .

s/m_s	$sq^{m_s} \equiv s(\text{mod } t)$	$L = \{s, sq, sq^2, \dots, sq^{m_s-1}\}$
$s = 0/m_s = 1$	$0 \cdot 2^{m_s} = 0(\text{mod } 31)$	$\{0\}$
$s = 1/m_s = 5$	$1 \cdot 2^{m_s} = 1(\text{mod } 31)$	$\{1, 2, 4, 8, 16\}$
$s = 3/m_s = 5$	$3 \cdot 2^{m_s} = 3(\text{mod } 31)$	$\{3, 6, 12, 24, 17\}$
$s = 5/m_s = 5$	$5 \cdot 2^{m_s} = 5(\text{mod } 31)$	$\{5, 10, 20, 9, 18\}$
$s = 6/m_s = 5$	$6 \cdot 2^{m_s} = 6(\text{mod } 31)$	$\{6, 12, 24, 17, 3\}$
$s = 7/m_s = 5$	$7 \cdot 2^{m_s} = 7(\text{mod } 31)$	$\{7, 14, 28, 25, 19\}$
$s = 9/m_s = 5$	$9 \cdot 2^{m_s} = 9(\text{mod } 31)$	$\{9, 18, 5, 10, 20\}$
$s = 10/m_s = 5$	$10 \cdot 2^{m_s} = 10(\text{mod } 31)$	$\{10, 20, 9, 18, 5\}$
$s = 11/m_s = 5$	$11 \cdot 2^{m_s} = 11(\text{mod } 31)$	$\{11, 22, 13, 26, 21\}$
$s = 12/m_s = 5$	$12 \cdot 2^{m_s} = 12(\text{mod } 31)$	$\{12, 24, 17, 3, 6\}$
$s = 13/m_s = 5$	$13 \cdot 2^{m_s} = 13(\text{mod } 31)$	$\{13, 26, 21, 11, 22\}$
$s = 14/m_s = 5$	$14 \cdot 2^{m_s} = 14(\text{mod } 31)$	$\{14, 28, 25, 19, 7\}$
$s = 15/m_s = 5$	$15 \cdot 2^{m_s} = 15(\text{mod } 31)$	$\{15, 30, 29, 27, 23\}$

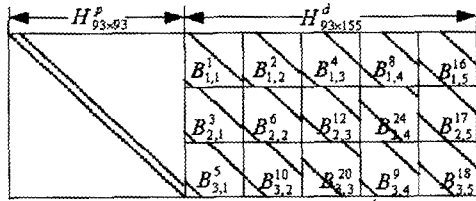


그림 6. SA-LDPC 부호의 예

Fig. 6. Example of the SA-LDPC code.

됨을 알 수 있다. H^d 구성을 위한 제 2 단계에서의 집합 $L_i (i=0, 1, 13)$ 의 분포를 표 2에 나타내었다. 행렬의 1의 위치는 $L_1, L_2, L_{r=3}$ 을 이용하여 결정하게 된다. 이러한 패리티 검사 행렬의 예를 그림 6에 나타내었으며, 점선은 1의 위치를, 나머지는 0을 나타낸다.

메시지 전달(message passing) 복호 알고리즘 [3]에 근거한 SA-LDPC 부호의 시뮬레이션 결과를 그림 7에 나타내었다. 시뮬레이션 결과로부터 기존 랜덤 레귤러 LDPC[3]에 비해 제안 SA-LDPC(irregular) 부호가 대략 0.5 dB의 성능 개선이 가능함을 확인하

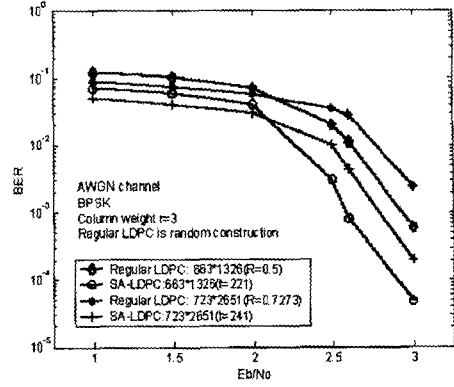


그림 7. SA-LDPC 부호의 성능

Fig. 7. Performance of SA-LDPC codes.

였다. 그러나 랜덤 구성의 LDPC 부호화는 다르게 MLC/PID 설계시 임의의 부호율을 갖는 SA-LDPC 부호의 구성은 곤란하다. 임의의 부호율에 대해 SA-LDPC 부호의 구성에 적합하지 않은 경우 다음의 과정을 거쳐 주어진 부호율에 근접하는 가능한 부호율을 고려하여야 한다. 일반적으로, SA-LDPC 부호의 부호율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R = \frac{n-M}{b} = \frac{tl}{tl+tr} = \frac{l}{l+r} \quad (15)$$

Semi-BICM을 이용하는 제안 MLC/PID 기법에서는 부호길이 n 의 $R_0 = 0.510$ 과 부호길이 $2n$ 의 $R_1 = 0.745$ 를 갖도록 해야 하며, $r = 3$ 을 가정하면,

$$R_0 = \frac{l_0}{l_0+3} = 0.510, \quad R_1 = \frac{l_1}{l_1+3} = 0.745 \quad (16)$$

따라서, $l_0 \approx 3, l_1 \approx 8$ 을 얻게 된다.

부호 길이를 고려하면,

$$\begin{aligned} t'_0 l_0 + t'_0 r &= (t'_1 l_1 + t'_1 r) / 2 \rightarrow t'_0 (l_0 + r) = \frac{t'_1}{2} (l_0 + r) \\ \rightarrow t'_0 (3+3) &= \frac{t'_1}{2} (8+3) \rightarrow t'_0 / t'_1 = 11/12 \end{aligned} \quad (17)$$

SA-LDPC 부호에서 t 는 소수이어야 하므로 t'_0 및 t'_1 와 가장 근사한 소수를 각각 t_0, t_1 이라 하자. 이는 부호길이 n 의 균형을 유지하기 위해 몇 개의 0을 삽입할 필요가 있음을 의미하는 것이다. 이러한 과정을 통해 MLC/PID 기법에 적합한 SA-LDPC

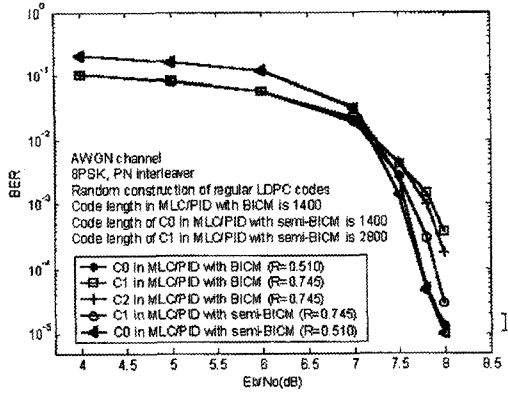


그림 8. 랜덤 구성의 레귤러 LDPC를 이용하는 semi-BICM MLC/PID 기법
 Fig. 8. MLC/PID with semi-BICM scheme by using random construction regular LDPC codes.

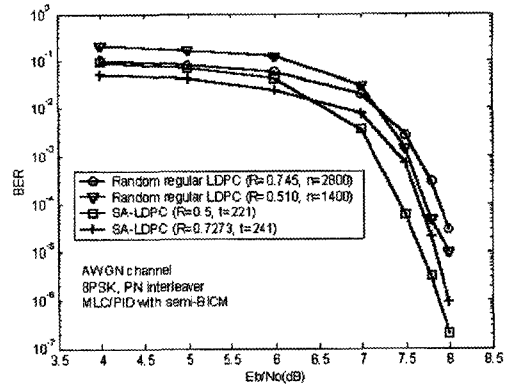


그림 9. SA-LDPC를 이용하는 semi-BICM MLC/PID 기법
 Fig. 9. MLC/PID with semi-BICM scheme by using SA-LDPC codes.

호를 설계할 수 있다.

3-2 시뮬레이션 결과

신호 y_k 로부터 각 비트 $c_{k,i}, i \in \{0, \dots, m-1\}, k \in \{0, \dots, m-1\}$ 에 관련된 대수 우도(logarithm likelihood ratio; LLR) $\Lambda(c_{k,i})$ 가 계산되며, 이진 LDPC 복호에 의한 연판정(soft decision)에 이용된다. AWGN 채널 상에서 LLR $\Lambda(c_{k,i}), i \in \{0, \dots, m-1\}$ 는 다음의 관계로부터 구해진다.

$$\Lambda(c_{k,i}) = k \log \frac{\sum_{a \in A, c_i=0} p(y_k | a)}{\sum_{a \in A, c_i=1} p(y_k | a)} = k \left[\log \frac{\sum_{a \in A, c_i=0} \exp(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2})}{\sum_{a \in A, c_i=1} \exp(-\frac{d_{a,y}^2}{\sigma^2})} \right] \quad (18)$$

여기서, K 는 상수이며, 본 논문에서는 $K=1$ 로 하였다. 랜덤 레귤러 LDPC 부호로서는 $r=3, n=1400, M=686$ 인 부호율 0.510의 LDPC 부호, $r=3, n=1400, M=357$ 인 부호율 0.745의 작은 LDPC 부호, 그리고 $r=3, 2n=2800, M=714$ 인 큰 LDPC 부호를 이용하였다. 반면에, SA-LDPC 부호는 저 부호율 부호로서 $R_0=0.5, r=3, l_0=3, l_0=220$ 과 가장 가까운 소수인 $l_0=221, n=1326, M=663$, 그리고 고 부호율 부호로서는 $R_1=0.7273, r=3, l_1=8, l_1=240$ 과 $l_1=241, n=2651, M=723$ 을 이용하였다. SA-LDPC 부호를 성분 부호로 이용하는 경우 부호 길이의 균형을 고려하

여 부호기 R_1 뒤에서 하나의 0을 삽입하였다.

그림 8에 나타낸 시뮬레이션 결과로부터 제안 MLC/PID 기법이 랜덤 레귤러 구성을 따르는 문헌 [6]의 BICM을 이용하는 일반적 MLC/PID 기법에 비해 부호율 0.745 및 부호율 0.510에서 약 0.2 dB의 성능 개선이 가능함을 알 수 있다. 수치해석 결과, 제안 기법에 의해 멀티미디어 통신 시스템의 전력 효율 및 대역폭 효율 모두 기존 방식에 비해 우수함을 알 수 있다. 또한 그림 9에 나타낸 SA-LDPC 부호에 의한 랜덤 레귤러 LDPC 부호에 비해 더욱 개선된 성능을 얻을 수 있지만, 대역폭 효율의 감소가 따르며, 부호 설계를 위한 파라미터 선정이 어려워지는 단점이 있으며, 시뮬레이션에서는 $R=0.5$ 인 저 부호율 부호, $R=0.7273$ 인 고 부호율 부호, 그리고 부호 길이는 각각 1326과 2651인 경우의 성능을 나타내고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 멀티미디어 통신 시스템에 적합한 BICM을 이용하는 MLC/PID에 대하여 고찰하였다. 제안 기법은 성분 부호의 수를 줄일 수 있으며, 채널 용량의 손실 없이 BER의 개선이 가능하다. 수치 해석 결과로부터, full BICM을 이용하는 MLC/PID 구조에 비해 semi-BICM을 이용한 MLC/PID 기법의 경우 0.2 dB의 성능 개선이 가능함을 확인하였으며, 기존 방식에 비해 LDPC 부호기와 복호기 하나씩을 즉

약할 수 있는 장점이 있다. 또한, LDPC 성분 부호의 구성에 대하여 고찰하였으며, AWGN 채널 환경에서 샤논 한계에 근접하는 우수한 특성과 단순한 구조를 특징으로 하는 SA-LDPC 부호를 소개하였다. 그러나, MLC/PID 구조에서 SA-LDPC 부호의 설계 파라미터를 결정하기가 쉽지 않으며, 몇몇 특별한 경우에만 효율적인 MLC 시스템 설계를 위해 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] U. Wachsmann, R. F. H. Fischer and J. B. Huber, "Multilevel codes: Theoretical concepts and practical design rules", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 45, pp. 1361-1391, Jul. 1999.

[2] G. Caire, G. Taricco and E. Biglieri, "Bit-interleaved coded modulation", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 44, pp. 927-946, May 1998.

[3] D. J. C. Mackey, "Good Error-Correcting Codes Based on Very Sparse Matrices", *IEEE Trans Inform Theory*, vol. 45, no. 2, pp. 399-431, 1999.

[4] M. M. Mansoor, N. R. Shanbhag, "Low power VLSI decoder architectures for LDPC codes", *Proceeding of the 2002 IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design*,

ISLPED'02, pp. 284-289, Aug. 2002.

[5] Yu Yi, Jia Hou and Moon Ho Lee, "Design of semi-algebra low density parity check (SA-LDPC) codes for multilevel coded modulation", *Proceeding of the Fourth IEEE International Conference on Paralle and Distributed Computing, Applications and Technologies*, PDCAT'03, pp. 931- 934, Aug. 2003.

[6] J. Hou, P. H. Siegel, L. B. Milstein and H. D. Pfister, "Capacity approaching bandwidth efficient coded modulation schemes based on low density parity check codes", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 49, no. 9, pp. 2141-2155, Sep. 2003.

[7] G. Ungerboeck, "Channel coding with multilevel/phase signals", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. IT-28, pp. 55-67, Jan. 1982.

[8] S. Y. Le Goff, "Channel capacity of bit-interleaved coded modulation schemes using 8-ary signal constellations", *IEE Electronics Letters*, vol. 38, no. 4, pp. 187-188, Feb. 2002.

[9] P. Li, W. K. Leung and N. Phamdo, "Low density parity check codes with semi-random parity check matrix", *IEE Electronics Letters*, vol. 35, no. 1, pp. 38-39, 1999.

이 광 재



1986년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1995년 2월: 전북대학교 전기공학과 박사수료
 1995년 3월~현재: 한려대학교 멀티

미디어 정보통신공학과 전임강사

[주 관심분야] 이동통신, 오류정정부호, RFID, 전력선통신

Yu Yi



2000년 6월: College of Computer Science, South-Central University for Nationalities, P.R.China (공학사)

2004년 2월: 전북대학교 전자정보공학부 (공학석사)

[주 관심분야] Space Time Code,

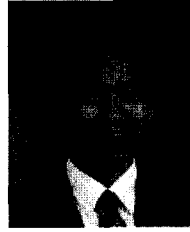
UWB, 오류정정부호 등

Jia Hou



2003년 2월: 전북대학교 전자정보공학부 (공학석사)
2003년 3월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 박사과정
[주 관심분야] Space Time Code, UWB, 오류정정부호 등

이 문 호



1967년 2월: 전북대학교 전기공학과 (공학사)
1976년 2월: 전북대학교 전기공학과 (공학석사)
1990년 2월: 일본 Tokyo University 정보통신공학과 (공학박사)
1981년 3월~현재: 전북대학교 전기전자공학부 교수
[주 관심분야] 이동통신, 정보이론, UWB 등