

Multiple-Input Multiple-output system을 위한 Low-Density Parity-Check codes 설계

정회원 신정환*, 준회원 채현두*, 한인득*, 종신회원 허준*

Design of Low-Density Parity-Check Codes for Multiple-Input Multiple-Output Systems

Jeong Hwan Shin* *Regular Member*, Hyun-Do Chae*, In-Duk Han* *Associate Member*,
Jun Heo* *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 extrinsic information transfer (EXIT) chart를 이용하여 다중 안테나 시스템에서 irregular low-density parity-check (LDPC) code를 설계하는 방법을 기술한다. 다중 안테나 기반의 Irregular LDPC code 설계를 위하여 maximum a posteriori probability (MAP) 방식의 다중 안테나 검출 방식이 사용되었으며 수신기는 다중 안테나 검출기와 LDPC 복호기 사이에서 복호된 soft 정보를 주고 받는 turbo iterative 구조를 가정하였다. 다중 안테나 기반의 irregular LDPC code의 edge degree 분포는 EXIT chart와 linear optimization programming 기법을 사용하여 얻을 수 있으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법으로 설계된 irregular LDPC code의 성능을 다양한 환경에서 검증하였다.

Key Words : LDPC code, MIMO, EXIT chart

ABSTRACT

In this paper we design an irregular low-density parity-check (LDPC) code for multiple-input multiple-output (MIMO) system, using a simple extrinsic information transfer (EXIT) chart method. The MIMO systems considered are optimal maximum a posteriori probability (MAP) detector. The MIMO detector and the LDPC decoder exchange soft information and form a turbo iterative receiver. The EXIT charts are used to obtain the edge degree distribution of the irregular LDPC code which is optimized for the MIMO detector. It is shown that the performance of the designed LDPC code is better than that of conventional LDPC code which was optimized for either the Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel or the MIMO channel.

1. 서론

세계 이동통신시장은 음성중심에서 데이터중심의 시장으로 빠르게 변화하고 있다. 음성통신에 있어서도 유선통신 서비스 시장에 비하여 무선통신의 수요는 빠르게 증가하고 있다. 즉, 고품질의 음성통신을 보장

하면서 초고속 광대역 데이터통신에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이와 더불어 모바일 통신수단에 대한 연구가 급속히 진전되고 있다. 이러한 세계적인 수요에 발맞추기 위해 최근 이동통신시장의 초고속 무선 전송을 위한 다중 안테나 전송 기법 즉, MIMO (Multiple Input Multiple Output) 기술이 통신 연구의

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2010-C1090-1031-0009)

* 고려대학교 전자전기공학과 (jhsh@korea.ac.kr, hdchea@korea.ac.kr, idhan@korea.ac.kr, junheo@korea.ac.kr)

논문번호: KICS2009-01-014, 접수일자: 2009년 1월 12일, 최종논문접수일자: 2010년 6월 21일

주된 관심 주제로 선정되어 활발한 연구가 진행되어 왔다. 4세대 초고속 무선 전송 기술의 핵심 기술 중 하나인 MIMO 기술은 여러 개의 송신 안테나들을 통하여 서로 독립적인 신호들을 전송함으로써 대역이 제한된 상황에서 높은 전송률을 달성할 수 있는 기술이다. 하지만 아직까지 오류가 발생할 경우에 이론적으로 얻을 수 있는 MIMO 기술의 성능과 실제 구현 가능한 MIMO 성능 사이에는 많은 차이를 보이고 있다. 이러한 MIMO 기술의 단점을 보완하기 위해서는 낮은 신호 대 잡음비에서도 높은 신뢰도를 가지면 고속의 데이터를 전송할 수 있도록 하는 오류정정부호와의 결합이 필요하다. LDPC (Low Density Parity Check) code^[1]는 세논의 channel capacity에 근접하는 성능을 보이는 오류정정부호로서 Turbo 부호에 비해 낮은 복호화 복잡도와 우수한 codeword minimum distance 특성으로 오류마루(error floor)현상이 나타나지 않으며, 완전 병렬 처리에 의한 고속 처리가 가능한 장점을 가지고 있다. 따라서 고속 데이터 전송을 위한 MIMO 기반의 통신시스템에 병렬 처리 복호기를 갖는 LDPC code의 접목이 다양하게 시도되어 왔다. 이를 위해서는 MIMO 시스템에 최적화된 LDPC code를 설계해야 하며, 기존의 MIMO 기반의 irregular LDPC code 설계 기법으로는 주로 EXIT chart^[2-3]와 density evolution^[4-5]에 의한 설계 방법이 많이 연구되어 왔다. 그러나 MIMO system과 LDPC 복호기 사이에 반복 복호가 진행되는 수신기와 같이 수학적으로 표현이 어려운 구조에서 density evolution에 의한 irregular LDPC code 설계는 한계를 가지고 있으며, 따라서 기존의 MIMO 기반의 irregular LDPC code 설계 기법들이 가지는 공통적인 특징은 MIMO 모델에 대한 closed form 접근이 어렵기 때문에 EXIT chart를 이용하여 MIMO 모델을 분석하는 것이다. 한편 [6]에서는 EXIT chart를 이용하여 AWGN 채널에서 단일 안테나 송수신 모델을 기반으로 gaussian approximation에 의한 오차를 최소화하는 기법으로 LDPC를 설계하는 기술이 소개되었다. 이 기법의 장점은 서로 다른 복호 블록의 복잡한 구조를 하나의 단위 블록으로 간주하여 접근하는 것으로, 결합된 단위 복호 블록은 EXIT chart를 이용하게 쉽게 특성을 파악할 수 있는 것이다. 본 논문에서, 이와 같은 단위 복호 블록의 접근방법을 MIMO 시스템에 최적화된 irregular LDPC code 설계 기법에 적용한다. MIMO system과 LDPC 복호 과정을 하나의 단일 연산 블록으로 구성하고, 구성된 블록의 특성을 EXIT chart를 이용하여 분석한다. 단일 복호 연산 블록의

EXIT chart 곡선들에 대한 선형 결합을 통하여 MIMO 기반의 irregular LDPC code의 edge degree 분포를 얻는 방법을 제시하고, 제시된 방법을 이용하여 설계된 irregular LDPC code의 성능을 시뮬레이션을 통하여 분석한다.

II. 본 론

2.1 시스템 모델

2.1.1 Coded MIMO 시스템

본 논문에서는 그림 1에서 보는 것과 같이 n_T 개의 송신 안테나와 n_R 개의 수신 안테나로 구성된 MIMO system에 연결된 irregular LDPC 구조를 고려한다. 송신기와 수신기 사이의 각 채널은 flat Rayleigh fading 채널을 가정하고 있으며 수신기의 각 안테나에 도착하는 신호들은 서로 다른 독립적인 fading 채널을 통하여 전송되었다고 가정하였다. 또한, 수신기는 채널의 상태를 완벽하게 안다고 가정하며, 송신기에서 정보 비트는 부호율 R 인 irregular LDPC code에 의해 부호화 된다. 각 codeword 비트는 2^M 개의 심벌을 갖는 complex 심벌로 변조되고, 각 심벌은 n_T 개의 안테나로 분산되어 독립적으로 전송된다. x 를 송신 안테나에서 전송되는 x_1, x_2, \dots, x_{n_T} 의 원소를 갖는 $n_T \times 1$ 심벌 벡터라 하고 y 를 y_1, y_2, \dots, y_{n_R} 의 원소를 갖는 $n_R \times 1$ 수신 신호 벡터라고 하면, y 는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

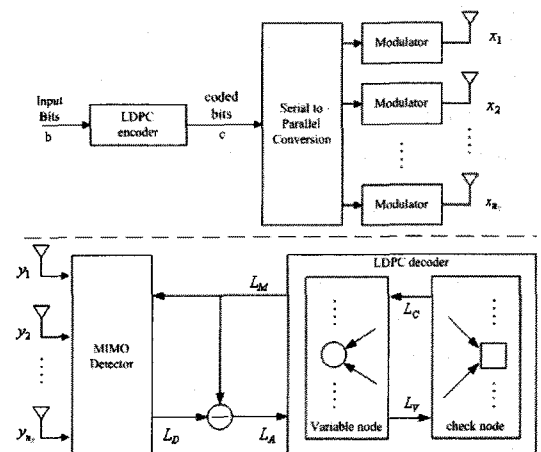


그림 1. 반복 복호를 사용하는 MIMO 기반의 LDPC code의 송수신기 구조

$$\underline{y} = H\underline{x} + \underline{n} \quad (1)$$

이 때, $H = [h_1, h_1, \dots, h_{n_T}]$ 는 $n_R \times n_T$ complex channel matrix로써 $h_i, i = 1, 2, \dots, n_T$ 는 i.i.d 특성을 갖는 평균이 '0'이고 단위 분산을 갖는 complex gaussian을 나타내며, \underline{n} 은 평균이 '0'이고 분산 $\sigma^2 = N_0/2$ 을 갖는 complex gaussian 벡터를 의미한다.

2.1.2 Irregular LDPC decoding

Irregular LDPC code의 복호를 위해 본 연구에서는 message-passing algorithm을 이용하였다. 먼저 variable node의 연산을 살펴보면, variable node에서 이웃한 check node로 전달되는 Log likelihood ratio (LLR) 정보는 MIMO detector에서 전달된 extrinsic information L_A 와 variable node 에 이웃한 d_v 개의 check node에서 전달되는 LLR 정보 L_C 의 합으로 구성되며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_{V,i} = L_A + \sum_{j=0, j \neq i}^{d_c-1} L_{C,j} \quad (2)$$

이 때, 첫 반복 복호에는 $L_{C,j}$ 에 대한 값이 없으며 variable node는 단순히 MIMO detector에서 온 LLR 정보를 이웃한 check node에 전달하는 역할을 하게 된다. check node에 의한 연산은 이웃한 variable node에서 전달되는 LLR 정보에 의해 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\tanh\left(\frac{L_{C,i}}{2}\right) = \prod_{j=0, j \neq i}^{d_c-1} \tanh\left(\frac{L_{V,j}}{2}\right) \quad (3)$$

이 때, check node의 연산에 참여하는 variable node의 LLR 정보는 irregular LDPC code의 parity-check matrix에 의해 구성된다. variable node 연산과 check node 연산은 l_C 번의 횡수만큼 내부 반복 복호를 수행하게 되며, 내부 반복 복호 후 외부 반복 복호를 위해 MIMO detector에 전달되는 LLR 정보 L_M 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_M = \sum_{j=0}^{d_c-1} L_{C,j} \quad (4)$$

2.1.3 Iterative MIMO detector

A posteriori probability (APP) MIMO detector는 수신 신호 \underline{y} 를 바탕으로 MIMO detector에서 irregular LDPC 복호기로 전송되는 LLR 정보 $b_k \in \{0, 1\}, k = 0, \dots, n_T M_C - 1$ 를 얻기 위해 아래와 같은 연산을 수행한다.

$$L_D(b_k | \underline{x}) = L_M(b_k) + \ln \frac{\mathcal{J}_0}{\mathcal{J}_1} \quad (5)$$

$$\mathcal{J}_0 = \sum_{\underline{x} \in \chi_k^0} p(\underline{x} | b_k = 0, b_{i \neq k} = c_i) \exp \left[\sum_{i, i \neq k} \tilde{c}_i L_M(b_i) \right]$$

$$\mathcal{J}_1 = \sum_{\underline{x} \in \chi_k^1} p(\underline{x} | b_k = 1, b_{i \neq k} = c_i) \exp \left[\sum_{i, i \neq k} \tilde{c}_i L_M(b_i) \right]$$

이 때, $L_D(b_k | \underline{x}) = \ln [p(b_k = 0 | \underline{y}) / p(b_k = 1 | \underline{y})]$ 는 MIMO detection 연산 후 LDPC code에 전달되는 사후 확률 정보를, $L_M(b_k) = \ln [p(b_k = 0) / p(b_k = 1)]$ 은 LDPC code에서 MIMO detector로 전달되는 사전 확률 정보를 나타낸다. χ_k^b 는 $b_k = b, b \in \{0, 1\}$ 인 $2^{n_T M_C - 1}$ 개의 원소를 갖는 벡터 집합을 나타내고 $\tilde{c}_i = -2c_i + 1$ 은 $c_i \in \{0, 1\}, i = 0, \dots, n_T M_C - 1$ 로 구성된다.

2.2 MIMO 기반의 irregular LDPC code 설계

2.2.1 Semi-gaussian 가정의 EXIT chart

EXIT chart^[7]는 반복 복호를 이용하는 통신 시스템을 분석하는데 매우 효과적인 분석 기법이다. 대부분의 경우 EXIT chart는 각 복호 블록이 주고받는 extrinsic 정보의 mutual information을 이용하여 각 복호 블록의 특성을 분석하며, 이 때, 각 복호 블록이 주고받는 정보의 probability density function (pdf)는 gaussian 분포를 만족한다고 가정한다. 많은 연구에서 EXIT chart를 이용한 irregular LDPC code의 분석 및 설계가 이루어졌으며, [6]에서는 EXIT chart를 이용하여 LDPC code의 복호 과정을 variable node와 check node의 두 연산으로 분리하지 않고 각 연산을 연속적으로 처리함으로써 variable node와 check node를 하나의 복호 블록으로 간주하는 semi-gaussian 가정의 분석 및 설계 기법이 제안되었다. semi-gaussian 가정 하에 LDPC code의 반복 복호는 channel에서 전달되는 정보와 이전 반복 복호의 출력을 현 반복 복호의 입력으로 사용하게 되며, 현 반복 복호의 출력은 역시 다음 반복 복호의 입력으로 사용

되는 구조를 가지게 된다. 대부분의 EXIT chart를 이용한 irregular LDPC code 설계 기법은 mutual information을 바탕으로 variable node와 check node의 EXIT chart 곡선을 얻기 위해서는 모든 extrinsic LLR information의 확률 특성이 gaussian 분포를 만족한다고 가정하고 있다. 하지만 check node의 출력 LLR 정보는 gaussian 분포와는 매우 다른 확률 특성을 가지고 있다. 따라서, check node에서 variable node로 전달되는 정보를 gaussian 이라고 가정하고 irregular LDPC code를 설계하는 경우에 gaussian 가정에 의한 성능의 열화를 가져온다. semi-gaussian 가정은 이러한 check node 출력의 gaussian 가정에 의한 성능 열화를 피하기 위해서 check node와 variable node를 하나의 단일 반복 복호 블록으로 간주하고 있으며, 단일 반복 복호 블록은 입력과 출력이 모두 variable node의 출력으로 이루어지고, 따라서 복호 블록의 EXIT chart 곡선을 얻기 위한 입력과 출력의 LLR 정보가 모두 gaussian 분포를 만족하는 형태를 가지게 된다.

2.2.2 EXIT chart를 이용한 MIMO 기반의 irregular LDPC code 설계 기법

[6]에서 소개된 semi-gaussian 가정의 irregular LDPC code 설계 기법은 MIMO 기반의 irregular LDPC code로 확장되어 적용 가능하다. Semi-gaussian 기법을 MIMO 기반의 irregular LDPC code로 적용하기 위해서 우리는 반복 복호의 각 복호 블록 중 그 출력 또는 입력 정보가 gaussian 분포를 만족하는 복호 블록을 선택해야 한다. 반복 복호에서 각 블록 사이에 주고 받는 정보는 먼저 MIMO detector와 LDPC decoder 사이의 extrinsic information 교환과 LDPC decoder를 구성하는 check node와 variable node 사이의 정보 교환을 생각 할 수 있다. 일반적으로 variable node 출력 LLR 정보의 확률 분포는 gaussian과 매우 유사한 확률 분포를 가지고 있다. 따라서 우리는 variable node의 출력을 반복 복호의 입력과 출력으로 하는 MIMO detector와 LDPC decoder를 포함하는 단일 복호 블록을 생각할 수 있다. 단일 복호 블록은 variable node의 출력을 블록의 입력과 출력으로 하기 때문에 단일 블록의 입출력 LLR 정보의 확률 분포는 충분히 gaussian 분포를 만족한다고 볼 수 있다. 그림 2는 MIMO detector와 LDPC decoder를 포함하는 단일 복호 블록의 구조를 나타내고 있으며 이러한 단일 복호 블록을 [6]에서와 같이 본 논문에서도 depth-one tree라고 명명한다.

EXIT chart를 이용하여 depth-one tree를 분석하기 위하여, 전송된 심벌의 정보량을 u 라고 하면 depth-one tree의 EXIT chart는 입력 정보량 u_{input} 과 채널에서 오는 수신 정보량 u_0 의 변화에 따른 출력 정보량 u_{output} 의 변화를 나타내는 곡선이 된다. 따라서 EXIT chart의 각 지점은 특정 채널 정보량 u_0 에서 현 반복 복호 입력에 따른 출력 정보량을 나타내고 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$u_{output} = F(u_{input}, u_0) \quad (6)$$

이 때, F 는 depth-one tree의 EXIT chart 곡선 함수를 의미하고 LDPC code의 구성, MIMO detection 기법, LDPC decoding 방법에 의해 서로 다른 곡선을 그리게 된다. Mutual information을 바탕으로 depth-one tree의 EXIT chart를 얻기 위해서 depth-one tree의 입력과 출력 확률 분포가 symmetric gaussian을 만족한다는 가정 아래 입력과 출력의 mutual information은 [8]에 따라 입력과 출력 LLR 정보의 평균값을 바탕으로 아래 식과 같이 유도 할 수 있다.

$$I \approx 1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log(1 + e^{-c_n L(c_n)}) \quad (7)$$

이 때, N 은 샘플 수를 나타내고, $c_n \in (+1, -1)$ 은 n 번 째 codeword를 의미하며 $L(\cdot)$ 은 심벌의 LLR 값을 나타낸다. depth-one tree의 EXIT chart 곡선을

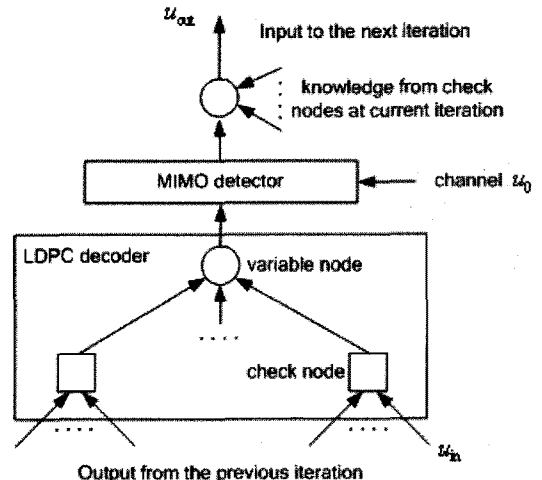


그림 2. 반복 복호 구조의 depth-one tree

나타내는 식(6)을 mutual information을 이용하여 다시 표현하면 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_{output,i} = f_i(I_{input}, I_0) \quad (8)$$

이 때, I_{input} 은 depth-one tree의 입력 LLR 값을 나타내고 I_0 과 I_{output} 은 각각 channel 정보량과 depth-one tree 출력의 LLR 값을 의미한다. Irregular LDPC code는 variable node와 check node를 연결하는 edge의 분포를 이용하여 정의할 수 있다. 따라서 Irregular LDPC code는 variable node와 check node의 degree 분포 $\lambda_2, \lambda_3, \dots$ 와 ρ_2, ρ_3, \dots 로 표현 가능하다. 식(8)에서 i 는 irregular LDPC code의 degree 분포를 나타내는 식별자이다. 동일한 MIMO detection 기법과 decoding 방법을 사용하더라도 depth-one tree는 degree의 분포에 의해 서로 다른 특성 곡선을 갖게 되며 따라서 우리는 degree에 의한 다양한 EXIT chart 곡선을 얻을 수 있다. 이러한 degree 변화에 따른 EXIT chart를 elementary EXIT chart라고 한다. depth-one tree의 출력과 입력은 variable node의 출력으로 그 확률 분포가 gaussian 분포를 만족한다. 따라서 그림 2에서 나타낸 depth-one tree의 EXIT chart의 얻기 위해 입력과 출력의 LLR 값의 평균을 통해서 입출력의 mutual information을 얻을 수 있다. 아래 식은 depth-one tree의 출력 LLR 값의 평균을 나타낸다.

$$m_i = m_{mimo} + (i-1)m_{chk} \quad (9)$$

이 때, m_{mimo} 는 MIMO detector의 출력 LLR 값의 평균값을 나타내고 m_{chk} 는 check node의 출력 LLR 값의 평균을 의미한다. 그림 3은 2×2 안테나 구조의 MAP detection을 사용하는 MIMO 기반에서 서로 다른 variable node degree를 갖는 depth-one tree의 elementary EXIT chart를 보여주고 있다. 이 때 check node의 edge는 '6'으로 고정 하였다. EXIT chart를 이용하여 MIMO 기반의 irregular LDPC code를 설계하기 위해서는 앞에서 설명한 방식에 따라 irregular LDPC code에 포함된 모든 degree 분포에 대해 elementary EXIT chart를 얻어야 하며 EXIT chart에 의한 irregular LDPC code를 설계는 서로 다른 variable node의 분포에 해당하는 elementary EXIT chart의 선형 결합을 이용하여 얻을 수 있다. variable node의 분포 $\lambda = \{\lambda_2, \lambda_3, \dots\}$ 를 갖는 MIMO 기반의 irregular LDPC code의 EXIT chart를 나타내면 아래

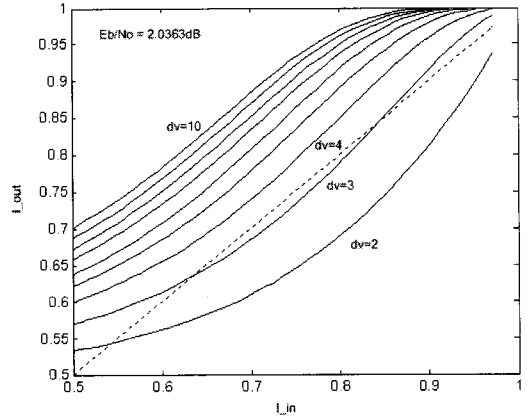


그림 3. 2×2 MAP detector를 사용한 LDPC code의 elementary EXIT chart

와 같은 식으로 표현 가능하다.

$$f(I_{input}) = \sum_{i \geq 2} \lambda_i f_i(I_{input}) \quad (10)$$

이 때, f_i 는 degree i 의 MIMO 기반의 depth-one tree의 elementary EXIT chart를 나타낸다. Irregular LDPC code의 설계를 위해서는 부호율을 최대화 하면서 EXIT chart의 모든 입력 구간에서 $f_i(I_{input}) > I_{input}$ 을 만족하는 elementary EXIT chart의 결합이 필요하다. 따라서 반복 복호를 수행하는 MIMO 기반의 irregular LDPC code의 설계 기법은 아래와 같은 선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{i \geq 2} \lambda_i / i \\ & \text{subject to} \quad \lambda_i \geq 0, \sum_{i \geq 2} \lambda_i = 1 \quad \text{and} \\ & \quad \sum_{i \geq 2} \lambda_i f_i(I_{input}) > I_{input}, \\ & \quad \forall I_{input} \in [I_0, 1) \end{aligned}$$

2.2.3 설계 예제

이번 절에서는 앞 절에서 설명한 irregular LDPC code 설계 기법을 이용한 실제 irregular LDPC 설계 예와 설계된 irregular LDPC code의 성능을 분석한다. 무선 채널 환경은 fast Rayleigh fading을 고려하였으며 수신기에서 채널 상태를 완벽히 안다고 가정 하였다. MIMO detection을 위해 MAP detector를 사용하였고 codeword 비트는 Gray-map QPSK 방식으로 변조되었다. 표 1은 elementary EXIT chart를 이용하여 설계한 irregular LDPC code의 edge-degree 분

표 1. MIMO 기반의 irregular LDPC code의 edge-degree 분포

edge degree 분포	
분포	2x2 MAP
λ_2	0.3983
λ_3	0.2010
λ_4	0.0927
λ_7	0.3080
ρ_6	1.0
부호율	0.4999
한계성능 (dB)	2.0363
Capacity E_b/N_0 (dB)	1.6

포를 보여준다. 설계된 LDPC code의 부호율은 1/2이며 check node의 edge-degree는 '6'으로 고정하였다. 설계된 irregular LDPC code의 한계 성능은 2.0363dB로 channel capacity와 0.43dB 정도의 차이를 갖는 것을 확인 할 수 있다. 그림 4는 본 연구에서 제시한 설계 기법으로 설계한 LDPC code와 다른 LDPC code와의 성능을 비교 분석한 내용이다. 시뮬레이션을 위해서 총 10회의 외부 반복 복호와 각 외부 반복 복호마다 3회의 내부 반복 복호가 이루어졌으며 모든 LDPC code의 codeword의 크기는 2304로 고정하였다. 그림 4에서 본 연구의 설계에 의한 LDPC code가 WiMAX irregular LDPC code^[9] 와 Density evolution에 의해 설계된 LDPC code^[4] 보다 좋은 성능을 보여주는 것을 확인 할 수 있다. 먼저 WiMAX

irregular LDPC code와 비교 분석하면 WiMAX irregular LDPC code는 AWGN 환경에서 단일 안테나 기반의 통신 환경에 최적화 된 LDPC code 이므로 다중 안테나, fading 환경에서 MIMO 기반으로 설계된 LDPC code에 비해 성능의 열화가 오는 것은 당연하다고 생각할 수 있다. Density evolution으로 설계된 LDPC code 같은 경우 [4]에서 density evolution으로 LDPC code를 설계하기 위해서 매우 큰 codeword 크기를 사용하고 상당히 많은 반복 복호를 실행하였다. 하지만 그림 4의 시뮬레이션 조건은 density evolution으로 설계된 LDPC code에 비해 상당히 작은 codeword 크기를 가지며 반복 복호도 매우 제한되어 있다. 따라서 이러한 시뮬레이션 조건의 차이가 성능의 열화를 가져온 것으로 보인다. 하지만 시뮬레이션을 통해 본 연구를 통해 제안된 방식의 LDPC code 설계 기법이 실제 통신 시스템에서와 같이 작은 codeword 크기와 제한된 반복 복호를 갖는 시스템에서 더욱 좋은 성능을 보여주는 것을 확인 할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 반복 복호를 수행하는 MIMO 기반의 통신 시스템에서 irregular LDPC code를 설계하는 기법을 소개하였다. irregular LDPC code 설계에서 check node의 출력 정보의 gaussian 가정에 의한 성능의 열화를 피하기 위해 MIMO detector와 LDPC decoder를 하나의 단위 복호 블록으로 간주하는 depth-one tree를 구성하였다. depth-one tree의 출력과 입력 정보의 확률 분포가 모두 gaussian 분포를 만족하는 것을 보였으며, mutual information을 바탕으로 EXIT chart를 통한 depth-one tree의 분석을 수행하였다. irregular LDPC code의 degree 분포에 따른 depth-one tree의 elementary EXIT chart를 분석하고 elementary EXIT chart를 이용하여 MIMO 기반의 irregular LDPC code를 설계하는 기법을 제안하였다. 또한 제안한 기법으로 설계된 irregular LDPC code의 한계성능을 보였으며 시뮬레이션을 통해 설계된 LDPC code의 성능을 분석하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. IT-8, pp.21-28, Jan. 1962.
- [2] Stephan ten Brink, Gerhard Kramer, and

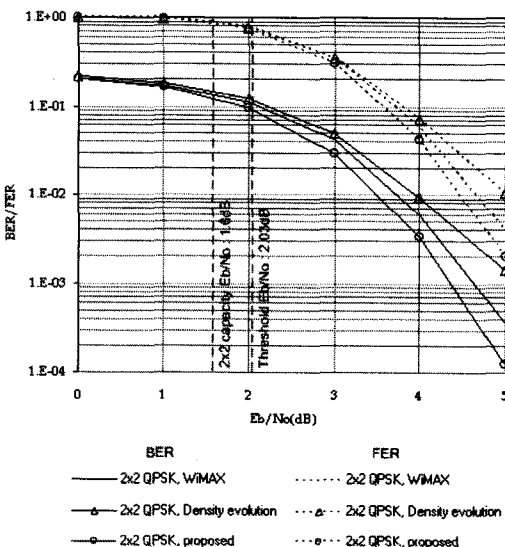


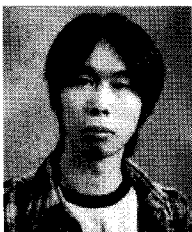
그림 4. 2x2 MAP detector 기반의 LDPC code 성능 곡선

Alexei Ashikhmin, "Design of Low-Density Parity-Check Codes for Modulation and Detection," IEEE Trans. Commun., Vol.52, No.4, pp.670-678, April 2004.

- [3] Stephan ten Brink and Gerhard Kramer, "Design of Repeat-Accumulate Codes for Iterative Detection and Decoding," IEEE Trans. Signal Process., Vol.51, No.11, pp.2764-2773, November 2003.
- [4] Jilei Hou, Paul H. Siegel, and Laurence B. Milstein, "Design of Multi-Input Multi-Output Systems Based on Low-Density Parity-Check Codes," IEEE Trans. Commun., Vol.53, No.4, April 2005.
- [5] Guosen Yue and Xiaodong Wang, "Optimization of irregular repeat accumulate codes for MIMO systems with iterative receivers," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol.4, No.6, Nov 2005.
- [6] Masoud Ardakani, Frank R. Kschischang, "A more accurate one-dimensional analysis and design of irregular LDPC codes," IEEE Trans. Commun., Vol.52, No.12, December 2004.
- [7] S. ten Brink, "Convergence of iterative decoding," Electronics Letters, Vol.35, No. 10, May 1999.
- [8] M. Tuchler, J. Hagenauer, "Exit charts of irregular codes," 2002 conference on information sciences and systems, Princeton University, March 20-22, 2002.
- [9] IEEE 802.16 Working Group, "Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems," IEEE P802.16e/D9, June 2005.

신정환 (Jeong Hwan Shin)

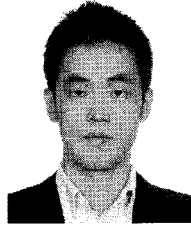
정회원



2005년 2월 건국대학교 전자공학과
 2007년 2월 건국대학교 전자공학과 석사
 2007년 3월~현재 고려대학교 전자기공학과 박사 과정
 <관심분야> 통신시스템, 채널코딩, MIMO

채현두 (Hyun-Do Chae)

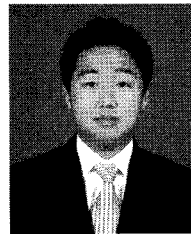
준회원



2007년 8월 고려대학교 전기전자학과 공학과
 2007년 9월~현재 고려대학교 전자전기공학과 석사 과정
 <관심분야> 정보시스템, 채널코딩, MIMO

한인득 (In-Duk Han)

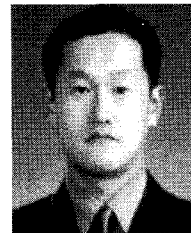
준회원



2007년 2월 광운대학교 정보 제어공학과
 2007년 9월~현재 고려대학교 전자전기공학과 석사 과정
 <관심분야> 통신시스템, 채널코딩, MIMO

허준 (Jun Heo)

종신회원



1989년 2월 서울대학교 전자공학과
 1991년 2월 서울대학교 전자공학과 석사
 2002년 2월 미국 USC 전자공학과 박사
 2003년 1월~2007년 2월 건국대학교 전자공학부 조교수
 2007년 3월~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수
 <관심분야> 통신시스템, 채널코딩, MIMO