

심볼 맵핑 다이버시티와 터보 복조를 사용하는 LDPC 부호 기반의 Hybrid ARQ 기법

정회원 안 석 기*, 종신회원 양 경 철*

Hybrid ARQ With Symbol Mapping Diversity and Turbo Demodulation based on LDPC Codes

Seok-Ki Ahn* *Regular Member*, Kyeongcheol Yang* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 LDPC 부호에 기반하여 동일한 패킷을 재전송함으로써 우수한 복호 성능을 얻을 수 있는 Hybrid ARQ 기법을 제안한다. 제안된 기법은 전송 시 마다 서로 다른 심볼 맵핑(mapping)을 사용하는 심볼 맵핑 다이버시티 기법과 수신단에서 복조기(demodulator)와 복호기(decoder) 간에 부가 정보(extrinsic information)를 주고 받는 터보 복조(turbo demodulation) 방식의 결합을 통해 복호 성공 확률을 높인다. EXIT (EXtrinsic Information Transfer) 도표를 사용하여 복호 성능을 분석하고 기존의 다양한 심볼 맵핑을 적용한 경우의 성능을 비교 분석한다.

Key Words : Hybrid ARQ, Mapping Diversity, Turbo Demodulation, LDPC Codes, EXIT Chart

ABSTRACT

In this paper we propose a high-performance Hybrid ARQ scheme employing Chase combining based on LDPC (Low-Density Parity-Check) codes. The proposed scheme uses symbol mapping diversity and turbo demodulation to improve decoding performance. We analyze the performance of the proposed scheme by EXIT (EXtrinsic Information Transfer) chart and compare its performance with several symbol mappings.

I. 서 론

무선 환경에서 통신 서비스를 제공하기 위해서는 데이터 전송 시 발생하는 오류를 보상해줄 수 있는 장치가 필수적이다. 이를 위한 대표적인 오류 제어 기법으로는 오류정정 능력을 가진 부호를 사용하여 수신된 정보의 오류를 정정하는 FEC (Forward Error Correction) 기법과 수신된 패킷에서 오류가 검출되면 재전송을 요구하는 ARQ (Automatic Repeat reQuest) 기법이 있다. FEC 기법만을 사용하는 경우에는 오류정정에 실패한 잘못된 정보가

사용자에게 그대로 전달되거나 모두 버려지게 된다. 또한 ARQ 기법은 FEC 기법보다 신뢰성은 높지만 채널 오류(error rate)이 증가함에 따라 정보처리량(throughput)이 급격히 감소한다는 단점이 있다. 이러한 단점들은 FEC와 ARQ 기법을 결합한 HARQ (Hybrid ARQ) 기법을 사용함으로써 극복될 수 있다.

HARQ 기법이 우수한 성능을 가지기 위해서는 복호에 실패한 수신 패킷의 복호를 도와줄 수 있는 재전송 패킷을 구성하는 것이 중요하다. 일반적으로 재전송 패킷의 구성 방식은 이미 전송된 패킷을 위한 추가적인 패리티를 전송하는 IR (Incremental

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2009-0059111)

* 포항공과대학교 전자전기공학과 통신 및 신호설계 연구실 (askstone@postech.ac.kr, kcyang@postech.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-05-219, 접수일자 : 2009년 5월 29일, 최종논문접수일자 : 2009년 9월 3일

Redundancy) 방식과 이미 전송된 패킷을 다시 전송하는 CC (Chase Combining) 방식으로 나뉘어진다^{[1],[2]}. IR 방식을 사용하면 전송된 패킷과 재전송된 패킷을 결합하여 복호함으로써 추가적인 부호 이득(coding gain)을 얻을 수 있고, CC 방식을 사용하면 전송된 패킷과 재전송된 패킷의 결합을 통해 유효(effective) 수신 SNR을 증가시킬 수 있다.

Gallager에 의해 소개된 LDPC (Low-Density Parity-Check) 부호는 Mackey와 Neal에 의해 재발견되어 큰 관심을 받게 되었다^[3]. LDPC 부호는 반복 복호를 통해서 채널 용량에 근접하는 성능을 보이는 것이 실험적으로 입증되어 다양한 통신 시스템에서 사용되고 있다^{[4],[5]}. 본 논문에서는 LDPC 부호에 기반하여 CC 방식을 사용하는 HARQ 기법을 제안하고 성능을 분석한다. 제안된 HARQ 기법은 전송 시 마다 동일 패킷에 다른 심볼 맵핑(mapping)을 적용하여 다이버시티를 얻는 심볼 맵핑 다이버시티 기법을 사용한다^[6]. 또한 복호 과정에서 복조기(demodulator)와 LDPC 복호기(decoder) 간에 부가 정보(extrinsic information)를 주고 받는 터보 복조(turbo demodulation) 방식을 사용하여 복호 성능을 향상시킨다^[7].

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 본 논문에서 고려하는 시스템에 대해 간단히 소개한다. 3절에서는 HARQ 기법에서 사용된 심볼 맵핑 다이버시티에 대해 설명하고, 4절에서는 터보 복조 방식에 대해 설명한다. 5절에서는 전산 실험을 통하여 HARQ 기법의 성능을 확인하고 EXIT (EXtrinsic Information Transfer) 도표를 이용하여 성능을 분석한다. 마지막으로 6절에서는 본 논문의 내용을 요약, 정리한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템을 그림 1에 나타내었다. 송신단에서는 LDPC 부호화기(encoder)를 사용하여 정보를 부호화하고 변조기(modulator)를 통해 전송 심볼을 생성한다. 복조기는 채널을 통과하여 수신된 심볼들로부터 LLR (Log-Likelihood Ratio) 값을 계산하여 LDPC 복호기에 전달한다. LDPC 복호기는 LLR 값을 메시지로 사용하는 신뢰도 확산(belief propagation) 알고리즘을 사용하여 정보를 복원한다. 이 과정에서 복조기는 복호기와 서로 부가 정보를 주고 받으며 터보 복조를 수행한다.

수신단은 수신된 패킷의 복호가 성공한 경우에는

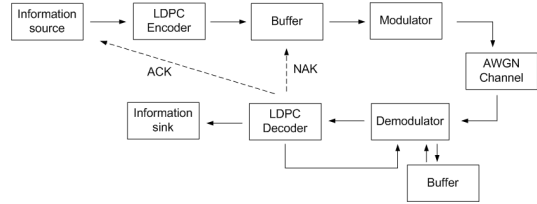


그림 1. 시스템 모델

송신단에 ACK (ACKnowledgement) 신호를 전송해 다음 패킷을 전송하게 하고, 복호가 실패한 경우에는 NAK (Negative AcKnowledge) 신호를 전송해 재전송을 요구한다. 부호화기에 연결된 버퍼(buffer)는 재전송에 사용되는 패킷을 저장하는 역할을 하고, 복조기에 연결된 버퍼는 복호에 실패한 패킷들을 저장하는 역할을 한다.

III. 심볼 맵핑 다이버시티 기법

본 절에서는 부호화된 하나의 패킷을 여러 번 전송하는 경우에 전송 시 마다 다른 심볼 맵핑을 사용하는 심볼 맵핑 다이버시티 기법에 대해 설명한다. 또한 수신된 심볼들로부터 LLR 값을 계산하는 방법을 설명한다. 변조기에서 사용되는 신호 성좌(signal constellation)를 C 라고 하면 부호화 과정을 거친 부호어 비트들은 $\log_2 C$ 개 단위로 레이블(label) $s \in \{0, 1, \dots, |C|-1\}$ 을 구성한다. 이 때, 심볼 맵핑은 생성된 레이블이 신호 성좌 내의 하나의 심볼로 변환되는 규칙을 나타내며, 다음과 같이 표현된다:

$$\psi: \{0, 1, \dots, |C|-1\} \rightarrow C.$$

하나의 패킷에 서로 다른 심볼 맵핑 ψ_1, \dots, ψ_M 이 적용되어 M 번 전송되는 경우, 임의의 레이블 s 는 서로 다른 심볼인 $\psi_1(s), \dots, \psi_M(s)$ 의 형태로 전송된다. 이 때, m 번째 수신된 심볼은 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$y_m = F_m(\psi_m(s)) + v_m.$$

여기서 $F_m()$ 은 m 번째 전송 시의 채널의 영향을 나타내며, v_m 은 평균이 0이고 분산이 σ_v^2 인 복소 가우시안(Gaussian) 잡음을 나타낸다.

H. Samra 등은 다양한 채널 모델과 신호 성좌에서 심볼 맵핑 다이버시티 기법 사용 시 BER을 최소화하는 맵핑을 도출하였다^[8]. 그림 2는 가산 백색

M = 1	→ 0000	1000	1001	0001
M = 2	→ 1111	0100	0101	1110
M = 3	→ 1100	0100	0101	1011
M = 4	→ 1101	0101	0111	1111
	×	×	×	×
	0100	1100	1101	0101
	1001	0010	0011	1000
	0011	1101	1010	0000
	0010	1110	1100	0000
	×	×	×	×
	0110	1110	1111	0111
	1011	0000	0001	1010
	0010	1000	1111	0001
	0001	1001	1011	0011
	×	×	×	×
	0010	1010	1011	0011
	1101	0110	0111	1100
	1001	0111	0110	1110
	1010	0100	0110	1000
	×	×	×	×

그림 2. 심볼 맵핑 다이버시티를 위한 16-QAM 심볼 맵핑 (M= 1, 2, 3, 4)

가우시안 잡음 채널(additive white Gaussian channel)에서 16-QAM (quadrature-amplitude modulation) 신호 성좌를 사용하는 경우에 최적화된 심볼 맵핑을 나타낸다⁶⁾.

그림 2에서 ×는 16-QAM 신호 성좌들을 나타내고, 4번의 전송에 사용되는 심볼 맵핑들은 각각의 신호성좌 위에 전송 순서대로 나열되었다. 각각의 ×는 4개의 레이블들을 가지고 있으며, 가장 위의 레이블들은 첫 번째 전송 시 사용되는 Gray 맵핑을 구성한다. 본 논문에서는 [6]에서 최적화된 심볼 맵핑을 사용한다.

복조기는 s를 구성하는 비트들의 LLR 값을 계산하기 위해 s가 전송된 경우에 y₁, ..., y_M이 수신될 확률을 다음과 같이 계산한다.

$$p(y_1, \dots, y_M | s) = \frac{1}{(\pi\sigma_v^2)^M} \exp\left(-\frac{\sum_{i=1}^M |y_m - F_m(\psi_m(s))|^2}{\sigma_v^2}\right)$$

또한 s의 i번째 비트 위치의 LLR 값은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{LLR}(s_i) &= \ln \frac{\sum_{s \in s_i^0} p(s|y_1, \dots, y_M)}{\sum_{s \in s_i^1} p(s|y_1, \dots, y_M)} \\ &= \ln \frac{\sum_{s \in s_i^0} p(y_1, \dots, y_M | s) p(s)}{\sum_{s \in s_i^1} p(y_1, \dots, y_M | s) p(s)}. \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 s_i⁰과 s_i¹은 각각 {0, 1, ..., |C|-1} 중에서 i 번째 비트 위치가 0과 1인 레이블들의 집합을 나타낸다. 복호기로부터의 부가 정보가 없는 경우에는 식 (1)에서 p(s) = 1/|C|이므로 LLR 값은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{LLR}(s_i) = \ln \frac{\sum_{s \in s_i^0} p(y_1, \dots, y_M | s)}{\sum_{s \in s_i^1} p(y_1, \dots, y_M | s)}.$$

IV. 터보 복조 방식

터보 부호의 등장으로 부가 정보를 주고 받는 터보 원리(turbo principle)를 이용한 시스템에 대한 연구가 활발해졌다. 터보 복조 방식은 이러한 터보 원리를 고차 변조(high order modulation) 방식을 사용하는 시스템에서 적용한 것이다⁷⁾. 이러한 터보 복조 방식을 사용하면 복조기와 복호기 간의 추가적인 연산과 그에 따른 메모리의 사용이 요구되지만 복호 성능을 향상시킬 수 있다. 그림 3은 터보 복조를 수행하는 복조기와 복호기 간의 메시지 전달 과정을 나타내며, 모든 메시지들은 LLR 값의 형태로 이동한다.

복조기는 수신 심볼들 y₁, ..., y_M과 복조기의 사전 정보(a priori information) L_{dec,pr}을 사용하여 전송된 레이블 s의 사후 정보(a posteriori information) L_{dec,po}을 식 (1)을 통해 계산한다. 이 때, L_{dec,pr}은 식 (1)에서 p(s)를 계산하는데 활용된다. 레이블 s를 구성하는 log₂|C| 비트들의 LLR 값을 나타내는 L_{dec,pr}은 다음과 같이 계산된다.

$$L_{\text{dec,pr}} = L_{\text{dec,ex}} = L_{\text{dec,po}} - L_{\text{dec,pr}}.$$

복호기는 부호어 비트들의 L_{dec,pr} 값을 사용하여 주어진 횟수의 반복 복호 후에 부호어 비트들의 사후 정보 L_{dec,po}을 생성한다. 마지막으로 복조기의 사전 정보 L_{dec,pr}은 다음과 같이 계산된다.

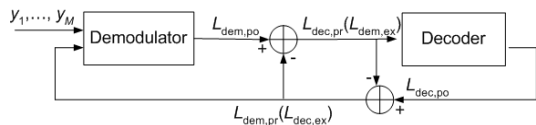


그림 3. 복조기와 복호기 간의 메시지 전달 과정

$$L_{\text{dem,pr}} = L_{\text{dec,ex}} = L_{\text{dec,po}} - L_{\text{dec,pr}}$$

이러한 터보 복조 방식은 natural 맵핑을 사용하는 길쌈 부호(convolution code)와 결합된 경우에 우수한 성능을 보이는 것이 알려져 있다⁸⁾. 하지만 LDPC 부호와 같이 우수한 성능을 보이는 부호는 터보 복조 방식을 사용하더라도 Gray 맵핑이 가장 좋은 성능을 보이며, Gray 맵핑을 사용하는 경우에는 터보 복조를 통한 성능 이득이 거의 없다⁹⁾. 제안된 기법은 LDPC 부호를 사용하지만 전송 시 마다 다른 맵핑을 사용하므로 재전송이 이뤄진 이후에는 터보 복조를 통해 추가적인 이득을 얻을 수 있다.

V. 전산 실험 결과 및 성능 분석

본 절에서는 가산 백색 가우시안 잡음 채널을 가정하고, 16-QAM 변조 방식을 사용하여 전산 실험을 수행하였다. 사용된 LDPC 부호는 부호율이 1/2, 길이가 4608이고 변수 노드(variable node)의 차수(degree)로 8, 3, 2만을 사용하였다. LDPC 부호의 차수 분포(distribution)는 밀도 진화 분석(density evolution) [4]을 통해 가산 백색 가우시안 잡음 채널에 최적화되었다.

5.1 심볼 맵핑 다이버시티 기법의 성능

그림 4는 LDPC 부호에 기반하여 전송 시 마다 동일한 Gray 맵핑을 사용한 경우(Gray)의 성능과 그림 2의 심볼 맵핑을 사용한 경우(SMD)의 성능을 비교한 것이다. 그림 4에서 M 은 재전송을 포함한

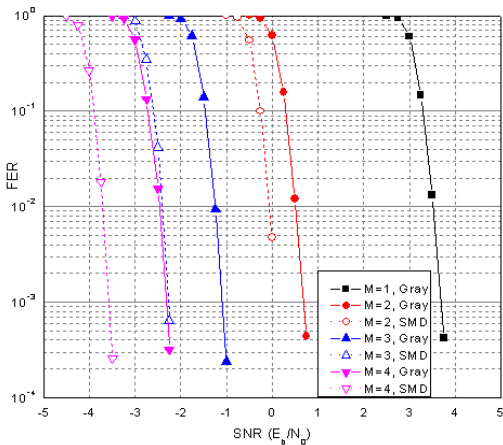


그림 4. 심볼 맵핑 다이버시티 기법의 성능

총 전송 횟수를 나타내며, M 이 커질수록 심볼 맵핑 다이버시티 이득이 커지는 것을 확인할 수 있다.

5.2 터보 복조를 통한 성능 이득

심볼 맵핑 다이버시티 기법이 사용된 경우에는 터보 복조를 통해 추가적인 성능 이득을 얻을 수 있음을 확인하기 위하여 Gray 맵핑만을 사용한 경우와 그림 2의 심볼 맵핑을 사용한 경우의 성능을 비교하였다. 그림 5는 동일한 패킷을 두 번 전송한 후에 터보 복조를 적용하지 않은 경우(Non-turbo)와 터보 복조를 적용한 경우(Turbo)의 성능을 나타낸다.

각각의 경우에 LDPC 부호의 반복 복호 횟수를 일정하게 유지하게 위하여 Non-turbo인 경우에는 LDPC 부호의 반복 복호를 50회 수행하였고, Turbo인 경우에는 복조기와 복호기 간에는 5번의 부가 정보 교환을 수행하고 각 교환마다 LDPC 부호의 반복 복호를 10회 수행하였다.

기존에 알려진 바와 같이 Gray 맵핑만을 사용한 경우에는 터보 복조를 통한 성능 이득이 거의 없음을 알 수 있다. 하지만 그림 2의 심볼 맵핑을 사용한 경우에는 1 dB에 가까운 추가적인 이득을 얻을 수 있었으며, 이러한 경향은 $M=3, 4$ 일 때에도 관찰되었다. 그림 6은 터보 복조를 적용한 경우에 Gray 맵핑만을 사용한 경우와 그림 2의 심볼 맵핑을 사용한 경우의 성능을 비교한 것이다.

제안된 기법에서 터보 복조를 사용함으로써 추가적인 성능 이득이 발생하는 이유를 분석하기 위해

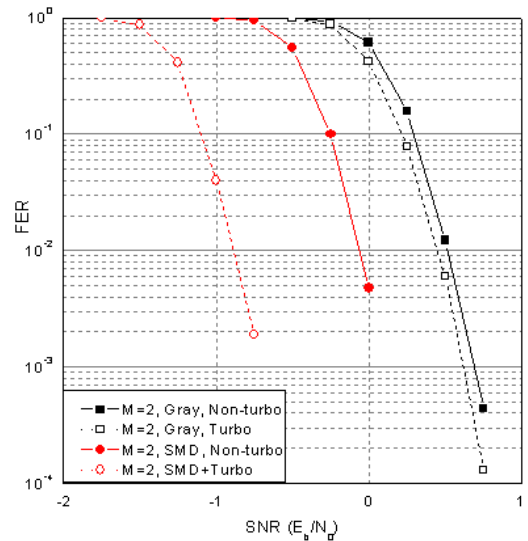


그림 5. 터보 복조를 통한 성능 이득

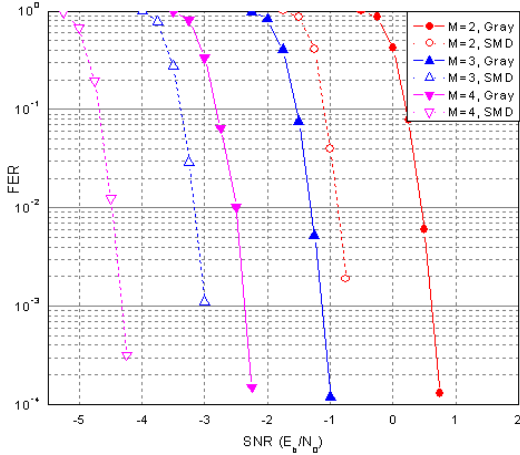


그림 6. 터보 복조 방식을 적용한 경우의 성능

서 복조기와 복호기에서의 부가 정보 입출력 과정을 나타내는 EXIT 도표를 사용하였다. EXIT 도표는 복조기나 복호기의 입력 메시지와 부호어 비트와의 상호 정보량(mutual information) I_A 와 출력 메시지와 부호어 비트와의 상호 정보량 I_E 의 관계를 도식한 것이다¹⁰⁾. EXIT 도표는 LDPC 부호의 복호 과정이나 터보 복조 과정과 같은 터보 구조를 가지는 시스템의 수렴 특성을 분석하는데 유용하게 사용되므로 본 절에서는 EXIT 도표를 사용하여 HARQ 기법의 성능을 분석하였다.

그림 7은 $M=2$ 이고 Gray 맵핑 또는 그림 2의 심볼 맵핑을 사용하는 경우에 복조기와 복호기의 EXIT 함수를 도식한 것이다. 가로축의 $I_{A,dec}$ 와 $I_{E,dec}$ 는 각각 복조기의 I_A 와 복호기의 I_E 를 나타내

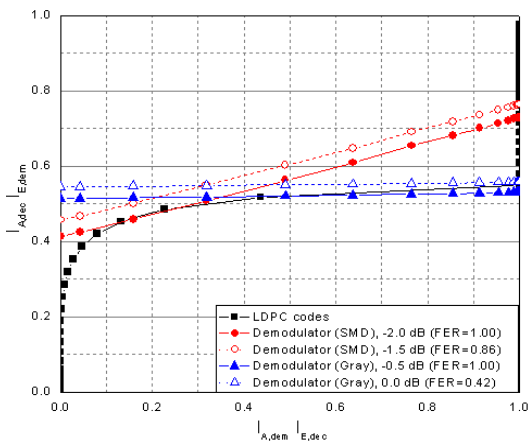


그림 7. 복조기와 복호기 간의 부가 정보 교환을 나타내는 EXIT 도표

고, 세로축의 $I_{A,dec}$ 와 $I_{E,dec}$ 는 각각 복조기의 I_A 와 복조기의 I_E 를 나타낸다. 터보 복조를 적용한 경우에 복호에 성공하기 위해서는 복호 궤적(trajectory)이 $I_{E,dec}=1$ 인 위치에 도달해야 하므로 복조기의 EXIT 곡선이 복조기의 EXIT 곡선보다 항상 위에 있어야 한다¹⁰⁾. 그림 7을 보면 Gray 맵핑만을 사용하는 경우에는 $SNR = 0.0$ dB 부근에서 복호에 성공하기 시작하며, 그림 2의 심볼 맵핑을 사용하는 경우에는 $SNR = -1.5$ dB 부근에서 복호에 성공하기 시작하는 것을 알 수 있다.

5.3 다양한 맵핑과 결합된 HARQ 기법의 성능

본 절에서는 터보 복조를 통한 성능 이득이 높다고 알려진 Anti-Gray, MSEW 맵핑들을 제안된 기법에 적용하여 성능을 비교한다. Anti-Gray 맵핑은 Gray 맵핑과는 반대로 신호 성좌 내에서 인접한 레이블 간의 해밍 거리(Hamming distance)를 최대화한 맵핑이다⁷⁾. 또한 MSEW (Maximum Square Euclidean Weight) 맵핑은 레이블 간의 해밍 거리가 1인 레이블들 사이의 거리를 신호 성좌 내에서 최대화한 맵핑이다¹¹⁾. 모든 경우에 첫 번째 전송에서는 Gray 맵핑을 사용하였으며, 이는 첫 번째 전송만 고려하면 Gray 맵핑의 성능이 가장 우수하기 때문이다.

그림 8은 $M=2$ 인 경우에 그림 2의 맵핑, Anti-Gray 맵핑 그리고 MSEW 맵핑의 성능을 비교한 것이다. Anti-Gray 맵핑과 MSEW 맵핑은 터보 복조를 통한 성능 이득은 그림 2의 심볼 맵핑과 유사하게 나타났다. 하지만 터보 복조를 적용하지 않은 경우에는 그림 2의 심볼 맵핑의 성능이 가장 우수

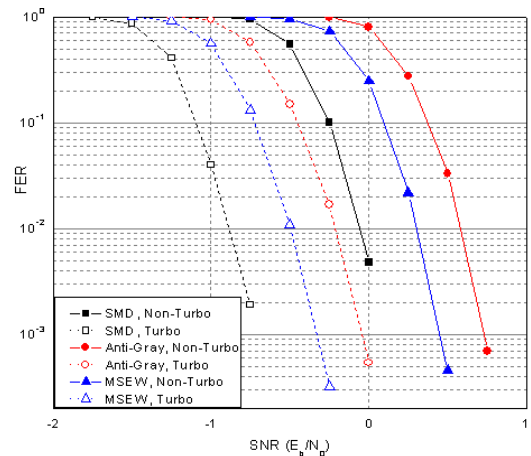


그림 8. 다양한 맵핑과 결합된 HARQ 기법의 성능

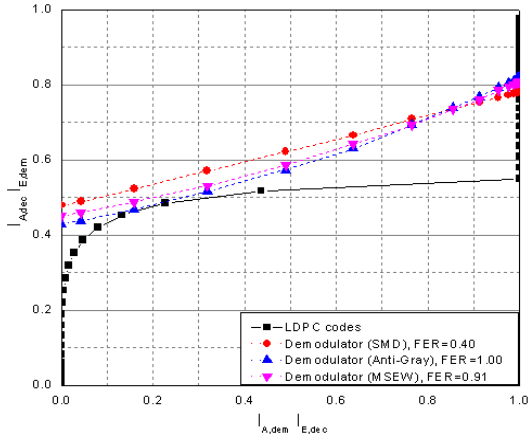


그림 9. 복조기와 복호기 간의 부가 정보 교환을 나타내는 EXIT 도표 (다양한 맵핑)

하여 터보 복조를 적용한 최종 복호 성능 또한 가장 우수하다.

본 절에서 고려한 다양한 맵핑의 성능을 분석하기 위하여 복조기의 EXIT 함수를 그림 9에 나타내었다.

그림 9는 SNR = -1.25 dB일 때, 각각의 맵핑을 사용한 복조기의 EXIT 곡선들을 도시한 것이다. 복조기의 입력 메시지의 신뢰도를 나타내는 $I_{A,dec}$ 가 1.0인 경우에는 그림 2의 심볼 맵핑을 사용한 복조기의 출력 메시지의 신뢰도가 가장 낮다. 하지만 LDPC 복조기의 EXIT 곡선을 고려한 복호 궤적을 그려보면 낮은 $I_{A,dec}$ 값에서 높은 $I_{E,dec}$ 값을 가지는 그림 2의 심볼 맵핑의 성능이 가장 우수한 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 LDPC 부호에 기반하여 심볼 맵핑 다이버시티 기법과 터보 복조 방식을 사용하는 HARQ 기법을 제안하고 EXIT 도표를 통하여 성능을 분석하였다. 또한 다양한 맵핑이 적용된 경우의 성능을 비교하고 분석하였다. 제안된 HARQ 기법은 다양한 채널 품질에 효과적으로 적용하기 위해서 전송된 패킷의 일부를 재전송하는 방법으로 확장될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] D. M. Mandelbaum, "An adaptive-feedback coding scheme using incremental redundancy,"

IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 20, pp. 388-389, May, 1974.

[2] D. Chase, "A combined coding and modulation approach for communications over dispersive channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.COM-21, No. 3, pp. 159-174, Mar., 1973.

[3] R. G. Gallager, *Low-Density Parity-Check Codes*. Cambridge, MA: MIT Press, 1963.

[4] T. J. Richardson, A. Shokrollahi, and R. Urbanke, "Design of capacity-approaching low-density parity-check codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 47, pp. 619-637, Feb., 2001.

[5] S. Y. Chung, G. D. Forney, T. J. Richardson, R. Urbanke, "On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit," *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 5, pp. 58-60, Feb., 2001.

[6] H. Sarma, Z. Ding, and P. M. Hahn, "Symbol mapping diversity design for multiple packet transmissions," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 53, No. 5, pp. 810-817, May, 2005.

[7] S. ten Brink, J. Speidel, and R. Yan, "Iterative demapping and decoding for multilevel modulation," in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conference*, pp. 579-584, Nov., 1998.

[8] X. Li, A. Chindapol, and J. A. Ritcey, "Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding and 8PSK signaling," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 50, No. 8, pp. 1250-1257, Aug., 2002.

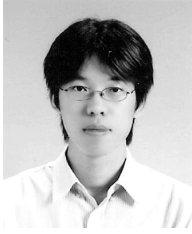
[9] Y. Li and W. E. Ryan, "Bit-reliability mapping in LDPC-coded modulation systems," *IEEE Commun. Lett.*, Vol.9, pp.1-3, Jan., 2005.

[10] S. ten Brink, "Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 49, No. 10, pp. 1727-1737, Oct., 2001.

[11] J. Tan and G. L. Stuber, "Analysis and design of symbol mappers for iteratively decoded BICM," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 4, No. 2, pp. 662-672, Mar., 2005.

안 석 기 (Seok-Ki Ahn)

정회원



2006년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 학사
2008년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 석사
2008년 3월~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 박사 과정
<관심분야> 광대역 통신 시스템, 부호이론

양 경 철 (Kyeongcheol Yang)

중신회원



1986년 2월 서울대학교 전자공학과 학사
1988년 2월 서울대학교 전자공학과 석사
1992년 12월 University of Southern California 전기공학과 박사
1993년 3월~1999년 2월 한양대학교 전자통신공학과 조교수
1999년 2월~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
<관심분야> 디지털 통신, 부호이론, 다중 안테나 시스템, 신호설계, 정보보호