

수직자기기록 채널에서 LDPC를 이용한 메시지 전달 방식의 채널 검출 성능비교

준회원 박 동 혁*, 종신회원 이 재 진*

Performance of LDPC with Message-Passing Channel Detector for Perpendicular Magnetic Recording Channel

Donghyuk Park* Associate Member, Jaejin Lee* Lifelong Member

요 약

수직자기기록 채널에서는 PRML(Partial-Response Maximum Likelihood) 검출방법이나 NPML(Noise-Predictive Maximum Likelihood) 검출방법을 이용한 방식으로 더 이상의 성능 향상을 기대하기 힘들게 되었다. 따라서 LDPC(Low-Density Parity-Check) 부호를 이용한 성능의 향상을 기대하게 되었는데, 본 논문에서는 메시지 전달 방식을 이용한 채널 검출기와 LDPC 부호를 결합시켜 병렬적으로 채널 반복부호를 수행하여 수직자기기록 채널에서의 성능을 보았다. 또한 메시지 전달 방식의 채널 검출기의 구현 복잡도를 근사화 방식을 이용하여 간단히 하였다.

Key Words : LDPC code, message-passing, PMR, channel iteration, iterative decoding

ABSTRACT

For perpendicular magnetic recording channels, it is hard to expect improving the performance by using the PRML or NPML. Hence, we exploit LDPC code to improve the performance. In this paper, we examine a single message-passing detector/decoder matched to the combination of a perpendicular magnetic recording channel detector and an LDPC code decoder. We examine the performance of channel iteration with joint LDPC code on perpendicular magnetic recording channel, and simplify the complexity of the message-passing detector algorithm.

I. 서 론

수직자기기록 방식 하드디스크의 저장 능력을 향상시키기 위하여 여러 가지 방법들이 연구되고 있다. 자기기록 밀도를 높임으로서 하드디스크의 저장 능력을 향상시킬 수 있지만, 밀도가 높아지면 더 심한 심볼간 간섭으로 인해 많은 에러가 생기게 된다. 따라서 수직자기기록 하드디스크의 고밀도화 연구가 진행될수록 그에 대한 에러를 정정할 수 있는 에러

정정코드의 연구가 필요하다. 지금까지 수직자기기록 검출기술이 요구된다. 밀도가 높아짐에 따라 인접 신호채널에서는 PRML과 NPML 방식으로 에러를 정정하였지만, 밀도의 증가를 위하여 더 강력한 에러정정능력을 가지는 부호의 연구가 필요하다. 현재 많은 연구가 진행되어 있고 그 중에 LDPC 부호가 유력한 해법으로 제시되고 있다^{[1][2]}.

수직자기기록 채널에서 SOVA(Soft-Output Viterbi Algorithm)를 채널 검출기로 이용하고 LDPC 부호

※ 본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실(manakq@hotmail.com), (zlee@ssu.ac.kr)
논문번호 : KICS2008-02-067, 접수일자 : 2008년 2월 4일, 최종논문접수일자 : 2008년 3월 31일

를 사용하여 채널 반복복호를 하면 성능이 좋아진다고 알려져 있다²⁾.

본 논문에서는 Kurkoski가 제안한 채널 검출기 방식 중 하나를 택하여 구현하고³⁾, 이 채널 검출기와 LDPC 부호의 채널 반복복호를 실험하여 성능 변화를 비교해 보았다. 이 채널 검출기를 수직자기기록 채널에 적용하기 위해서는 트렐리스에서 확률값을 정의할 때 해밍거리를 통한 확률의 정의가 필요하다. 본 논문에서는 실험을 통해 확률값을 정의하여 수직자기기록 채널에 적용하였다. 부호패리티 검사행렬은 부호율이 0.94이고 코드 길이가 4336비트, 패리티 길이가 240비트인 (4336,240) LDPC 부호를 사용하였다. 패리티 검사 행렬은 열무게가 3인 행렬을 사용하였다. 그러나 Richardson이 제안한 부호화 방식⁴⁾을 사용하기 위해 패리티 검사 행렬의 뒷 부분은 이중대각(dual diagonal) 구조를 포함하는 행렬을 사용했다. 또한 근사화 방법을 이용하여 기존의 알고리즘의 연산량을 줄인 방법을 제안하였다.

II장에서는 수직자기기록 채널의 모델을 간단히 소개하고, III장에서는 구현된 채널 검출기와 결합 메시지 전달 방식의 구현 특징을 보여준다. IV장에서 시뮬레이션의 결과를 보여주고, V장에서 결론을 내린다.

II. 수직자기기록 채널

수직자기기록 시스템의 채널 모델은 단일 천이 계단 응답 함수 $g(t)$ 로 나타낸다.

$$g(t) = A \times \tanh\left(\frac{2t}{0.597\pi \times T_{50}}\right) \quad (1)$$

여기서 A 는 $g(t)$ 의 최대값의 크기이고 T_{50} 은 $g(t)$ 펄스가 $-A/2$ 에서 $A/2$ 까지 걸리는 시간이다. 기록밀도의 정의는 T_{50}/T_b 이다. T_b 는 비트 간격이다. 실험에 사용한 A 값은 1이며, 비트 간격은 1로 하였다. 수직자기기록 채널을 통과한 출력 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h(t-kT) + n(t) \quad (2)$$

여기서 a_k 는 입력 비트, $h(t)$ 는 임펄스 응답 함수, $n(t)$ 는 가우시안 잡음이다. $h(t)$ 는 이중 비트 응답으로 다음과 같이 표현된다.

$$h(t) = g(t) - g(t-T) \quad (3)$$

본 실험에서 비트단위의 입력을 식(2)에 적용하지 않고 60개로 샘플링 한 모델을 사용하였다.

III. 구현 알고리즘

3.1 메시지 전달 방식의 채널 검출기

Kurkoski가 제안한 채널 검출기는 BCJR 알고리즘과 그 형태가 유사하다. 그림 1은 Kurkoski가 제안한 채널 검출기의 다이어그램이다. 삼각형은 상태 확률 정보를 가지는 노드이며 인접 노드들과 상태 확률 정보를 주고 받는다. 실선은 확률 정보를 주고 받을 수 있다는 것을 뜻하며, 화살표 방향으로 확률 정보가 전달된다. $P[x_n]$ 과 $P[y_n|r_n]$ 은 각각 채널의 입력 심볼의 확률과 출력 심볼의 확률이다. LDPC 부호의 길이가 N 이라면, 채널 검출기에서의 상태노드의 길이는 $N+\alpha$ 이다. α 는 PR 채널에서의 종료상태(termination state) 노드의 길이이다. 본 논문에서는 채널 부분응답 다항식으로 PR(12321)을 사용하였으므로 $\alpha=4$ 이다.

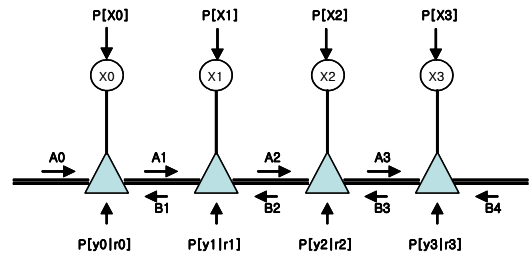


그림 1. 메시지 전달 알고리즘 다이어그램

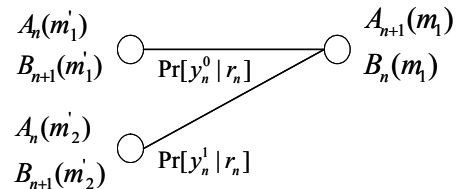


그림 2. 트렐리스 연결 다이어그램

시간 t 가 n 일 때의 상태는 m' 으로 표현하고 시간 $n+1$ 일 때의 상태는 m 으로 표현한다. 검출기 구현에 있어서는 PR 채널의 검출 알고리즘을 따라 상태노드의 트렐리스 알고리즘을 사용한다. 각 시간마다 $M=2^L$ 인 상태 개수가 있으며, 시간 n 은 $n=0, \dots, N-1$ 이다. $A_n(m)$ 과 $B_n(m)$ 은 각각 노드의 오른쪽 방향과 왼쪽 방향으로 상태 정보를 전달

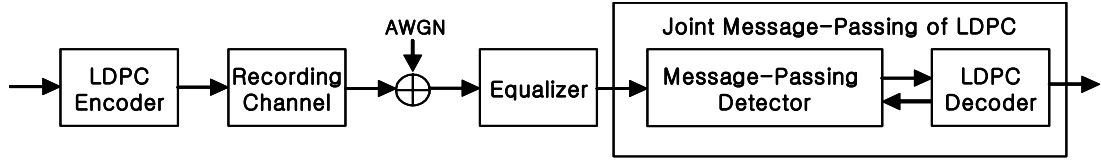


그림 3. 결합 메시지 전달 알고리즘을 적용한 시스템

하는 변수이다. 각 트래이스마다 $2M$ 개의 연결이 존재한다.

$$A_{n+1}(m) = \sum A_n(m') \Pr[x_n^k] \Pr[y_n^k | r_n] \quad (4)$$

$$B_n(m') = \sum B_{n+1}(m) \Pr[x_n^k] \Pr[y_n^k | r_n] \quad (5)$$

$$\Pr[x_n] = \sum A_n(m') \Pr[y_n^k | r_n] B_{n+1}(m) \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 채널 검출기의 출력 확률 정보를 계산한다. $A_n(m)$ 과 $B_n(m)$ 은 확률 정보이므로 같은 t 일 때의 $\sum A_n(m)$ 과 $\sum B_n(m)$ 은 1로 정규화시켜준다. 식 (4)와 (5)에서 보면 알 수 있듯이, LDPC 복호된 확률 정보 $\Pr[x=0]$ 과 $\Pr[x=1]$ 를 채널 검출기의 확률 정보 $\Pr[x_n^k]$ 로 바로 적용할 수 있다. 채널 검출기를 구현하는 과정에서 확률 정보 PR(12321)에서 y 의 값이 $\{-9, -7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7, 9\}$ 의 정답값을 가지게 된다.

y 의 값이 -1, 1의 두 종류로 결정되었다면 $\Pr[y_n^k | r_n]$ 의 값을 쉽게 구할 수 있다. 하지만 수직자기기록 채널에서는 값이 여러 가지의 경우의 수를 가지므로 $\Pr[y_n^k | r_n]$ 의 값을 구하는 것이 쉽지 않다. 채널을 통과한 후의 값인 r_n 의 값이 주어졌을 때 결정해야하는 y_n^k 의 값을 확률값으로 나타내기 위해서 r_n 과 y_n^k 의 해밍거리(d)를 확률값으로 변경할 필요가 있다. 따라서 본 실험에서 $\Pr[y_n^k | r_n]$ 을 다음으로 정의하였다.

$$\Pr[y_n^k | r_n] = \frac{1}{1+d^2} \quad (7)$$

구현 과정에서 종료상태(termination state)로 블록을 끝내기 위해 한 블록씩 생성하여 각각을 LDPC 부호화하여 채널을 통과한 후 등화기를 거쳐 채널 검출기를 거쳐서 LDPC 복호하여 성능을 테스트 하였다. LDPC 부호화 된 신호의 길이가 n 일 때 채널을 통과하고 등화기를 통과한 신호의 길이도 역시 n 이어야 한다. 따라서 그림 4처럼 콘볼루션 연산을 위해 LDPC 부호화된 신호의 길이 n 에 앞뒤로 35개의 '0'을 붙여주어 신호의 길이를 맞췄다.

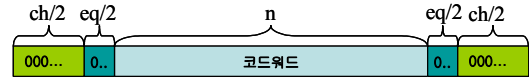


그림 4. 채널 통과를 위한 블록 패턴

3.2 결합 메시지 전달 알고리즘

채널 검출기의 출력 정보는 $\Pr[x_n]$ 이다. 즉, $\Pr[x=0]$ 과 $\Pr[x=1]$ 이 출력 정보이고, 이것을 LDPC 부호의 복호기에서는 입력으로 받아서 복호 연산을 실행한다. LDPC 부호의 출력 정보는 $\Pr[x=0]$ 과 $\Pr[x=1]$ 이며, 이것을 채널 검출기 $\Pr[x_n^0]$ 에 LDPC 복호기의 $\Pr[x=0]$ 값을, 채널 검출기의 $\Pr[x_n^1]$ 에 LDPC 복호기의 $\Pr[x=1]$ 값을 각각 넣으면서 반복 복호를 실행할 수 있다. 이렇게 채널 검출기와 LDPC 부호의 복호기를 결합시킴으로써 해서 병렬적으로 채널 반복복호를 실행할 수 있는 장점이 있다. 채널 검출기에서 종료 상태의 입력 심볼의 확률 정보는 존재하지 않지만, 트래이스 계산 과정에서 필요하기에 $\Pr[x_n^k] = 1/2$ 로 고정시켰다.

표 1. 시스템 설정

LDPC 부호	코드길이 4336, 코드율 0.94
PR 타겟	PR(12321)
잡음 환경	100% AWGN
채널 밀도(T_{50}/T_b)	1.4
반복 복호 횟수	채널 반복복호 3회 LDPC 반복복호 25회

3.3 계산량을 줄인 결합 메시지 전달 알고리즘

기존의 알고리즘은 계산량에 있어서 큰 복잡도를 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 로그 도메인에서 계산을 실행하고 근사화 방법을 이용하여 복잡도를 줄였다^[5].

$$\ln \sum_j e^{a_j} \approx \max_j a_j$$

위의 근사화 방법을 이용하여 계산량을 줄여 개선

된 알고리즘을 구현하였다.

1) 초기화

$$LA_0(m) = LB_N(m) = \begin{cases} 0, & m = 0 \\ -\infty, & m \neq 0 \end{cases}$$

$$LA_n(m) = LB_n(m) = -\ln(M), \quad \forall m, n \neq 0, N$$

2) 노드연산

$$LA_{n+1}(m) \approx \max[LA_n(m') + \ln(\Pr[x_n]) + \ln(\Pr[y_n|r_n])]$$

$$LB_n(m') \approx \max[LB_{n+1}(m) + \ln(\Pr[x_n]) + \ln(\Pr[y_n|r_n])]$$

3) $\ln(\Pr[x_n])$ 구하기

$$\ln(\Pr[x_n]) \approx \max[LA_n(m') + \ln(\Pr[y_n|r_n]) + LB_{n+1}(m)]$$

위 알고리즘을 사용하여 채널 검출기와 채널 복호기를 구현한다. 채널 검출기와 채널 복호기가 주고 받는 정보는 알고리즘 3의 결과 사후확률(extrinsic probability)로 주고 받는다. 채널 검출기에서는 채널을 통과한 채널정보와 채널 복호기에서 다시 입력된 사후확률을 사용하여 연산하고, 채널 복호기에서는 채널 검출기에서 나온 사후확률을 가지고 연산을 한다.

IV. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

LDPC 부호의 복호기 구현에 있어, LDPC 부호의 복호 정보를 채널 검출기로 다시 보내어 반복 복호를 수행하는 방법이 성능을 더 좋게 만든다는 것은 이미 알려져 있다. 구조적 방식의 LDPC 패리티 검사 행렬을 사용하여 시뮬레이션을 수행하고, 수직자기기록 채널에서 기록밀도는 1.4로 하였으며, PR(12321)을 타겟으로 사용하였다. LDPC 부호의 최대 반복 횟수는 25회로 하였고, 채널 반복복호는 최대 3회까지 실행하여 결과를 보았다. 채널 반복복호가 1회인 것은 LDPC 부호 복호기의 출력을 채널 검출기로 다시 넣지 않고 결과를 낸 것이다. 잡음 환경은 100% AWGN이다. 본 실험에서 SOVA+LDPC와 결합 메시지 LDPC의 성능을 비교하였는데, 두 경우 모두 같은 패리티 검사 행렬의 LDPC 부호를 사용하여 복호기를 구현하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

그림 5에서 보면 Joint LDPC 부호의 복호 성능이 SOVA+LDPC 부호의 복호 성능보다 좋은 것을 알 수 있다. 그림 6에서 보면 LDPC 부호의 채널 반복복호의 횟수가 클수록 성능이 좋아지기는 하지만, 채널 반복 횟수가 크다고 성능이 계속 향상되는 것은 볼 수 없다.

그림 7은 채널 반복복호에 따른 섹터오율을 나타낸다. 여기서 섹터는 4096비트의 메시지이다. 하드 디스크 시스템에서는 섹터 단위(512바이트)로 읽기, 쓰기를 하기 때문에 그 단위인 512바이트(4096비트)를 섹터로 정의한다.

그림 8과 그림 9는 각각 채널 검출기 통과 후의 섹터당 에러의 분포와 LDPC 부호의 복호기 통과 후의 섹터당 에러의 분포이다. 채널 반복복호를 2회 하였을 때 그림 9(b)에서 섹터당 에러의 수는 31개의 에러가 1심볼, 29개의 에러가 1심볼, 25개의 이하의 에러가 난 섹터들이 몇 개 존재하고 있음을 알 수 있다. 반면 채널 반복복호를 3회 하였을 때는 그림 9(c)처럼 섹터당 최대 에러 수는 36개로 더 증가하는 것을 보였다. 이것은 LDPC 부호의 복호기를 사용하여도 더 이상 고치지 못하는 것이 있음을 보여준다. 섹터당 에러의 분석은 SNR이 18일 때 30,000블록을 테스트 하여 얻은 결과이다.

채널 반복복호의 횟수가 많아지면, 계산량도 많아지고 시간지연도 커진다. 따라서, 그림 6~9의 결과를 통해 볼 때, 섹터 당 에러의 수와 계산량, 비트오율, 섹터 오율의 관계를 고려할 때 채널 반복복호의 횟수는 2회가 적당하다.

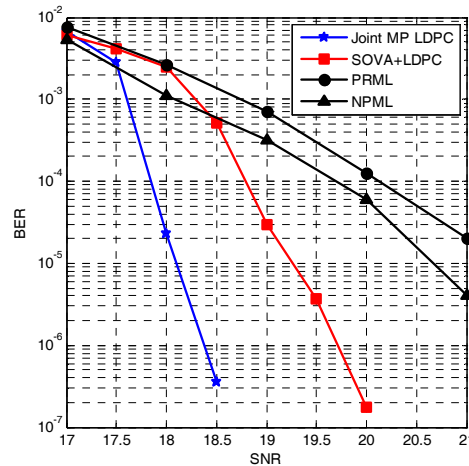


그림 5. SOVA+LDPC와 결합 메시지 LDPC의 성능비교

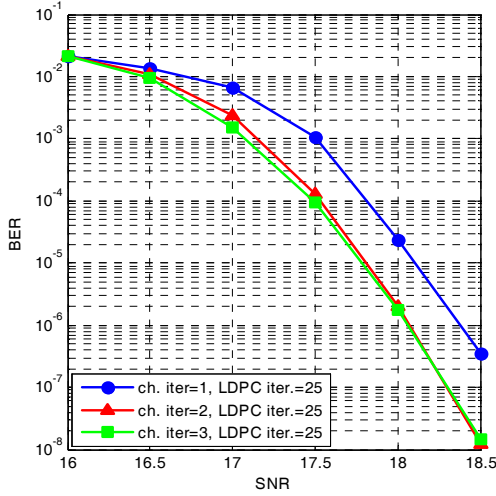


그림 6. 결합 메시지 LDPC의 채널 반복복호 성능(비트 오류)

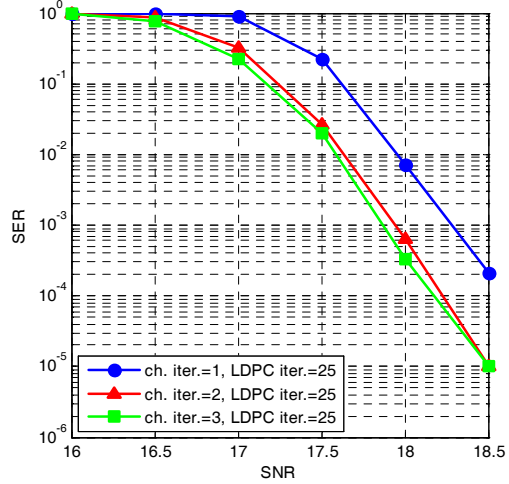
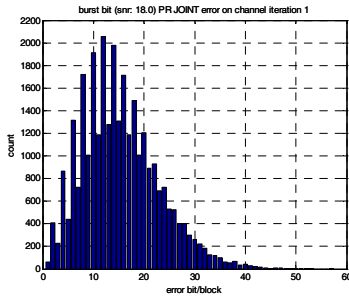
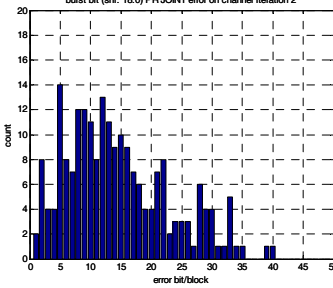


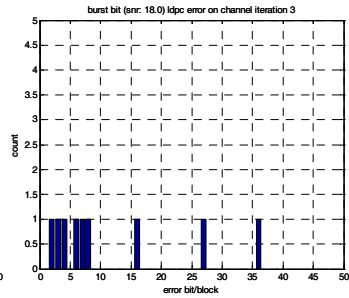
그림 7. 결합 메시지 LDPC의 채널 반복복호 성능(섹터 오류)



(a) 채널 반복복호 1회

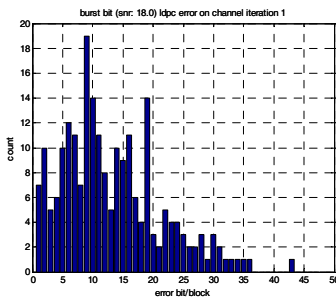


(b) 채널 반복복호 2회

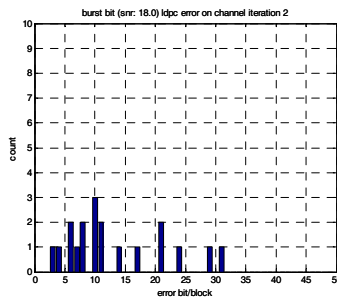


(c) 채널 반복복호 3회

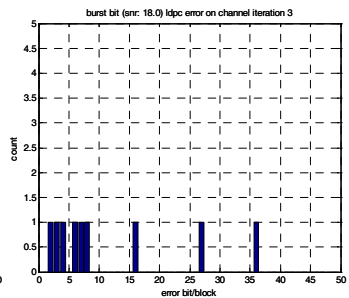
그림 8. 채널 검출기 통과 후의 섹터당 에러 수



(a) 채널 반복복호 1회



(b) 채널 반복복호 2회



(c) 채널 반복복호 3회

그림 9. LDPC 부호의 복호기 통과 후의 섹터당 에러 수

IV. 결론

LDPC 부호를 이용한 시스템에서는 대개 SOVA 알고리즘을 이용하여 채널 검출기를 구현한다. 따라

서 LDPC 부호가 병렬구조로 구현 될 수 있는 장점이 있음에도 SOVA를 이용함으로써 SOVA의 직렬구조의 연산시간을 기다려야 하는 단점이 있다고 볼수 있다. 따라서 본 논문에서는 병렬구조의 메시지 전달 알고리즘을 이용하여 채널 검출기를 구현

하였으며, 불규칙적인 LDPC 부호를 사용하여 결합된 형태로 구현하여 수직자기기록 채널에서의 성능을 보였다. 또한 메시지 전달 알고리즘을 이용한 채널 검출기를 구현하는데 있어 구현 복잡도를 줄이기 위하여 근사화를 이용한 개선된 알고리즘을 제안하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. G. Gallager, *Low-density parity check codes*, Cambridge, MA: MIT Press, 1963.
- [2] X. Hu and B. V. K. V. Kumar, "Evaluation of low-density parity-check codes on perpendicular magnetic recording model," *IEEE Trans. Mag.*, Vol.43, No.2, pp.727-732, Feb. 2007.
- [3] B. M. Kurkoski, P. H. Siegel and J. K. Wolf, "Joint message-passing decoding of LDPC codes and partial-response channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.48, No.6, pp.1410-1422, June 2002.
- [4] T. J. Richardson and R. L. Urbanke, "Efficient encoding of low-density parity-check codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.47, No.2, pp.638-656, Feb. 2001.
- [5] A. J. Viterbi, "An Intuitive Justification and a simplified implementation of the MAP decoder for convolutional codes," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.* Vol. 16, No.2, pp.260-264, Feb 1998.

박 동 혁 (Donghyuk Park)

준회원



2007년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2007년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사과정
<관심분야> 스토리지 시스템, LDPC 부호, 채널코딩

이 재 진 (Jaejin Lee)

종신회원



1983년 2월 연세대학교 전자 공학과 학사
1984년 12월 U. of Michigan, Dept. of EECS 석사
1994년 12월 Georgia Tech. Sch. of ECE 박사
1995년 1월~1995년 12월 Georgia Tech. 연구원
1996년 1월~1997년 2월 현대전자 정보통신 연구소 책임 연구원
1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과 부교수
2005년 9월~숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수
<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 기록저장 시스템