

# 수직자기기록 채널에서 잡음 예측 터보 등화기의 성능

준회원 김진영\*, 종신회원 이재진\*

## Performance of Noise-Predictive Turbo Equalization for PMR Channel

Jinyoung Kim\* Associate Member, Jaejin Lee\* Lifelong Member

요약

본 논문에서는 수직자기기록 채널에서 잡음 필터를 사용한 잡음 예측 터보 등화기를 제안한다. 고밀도 수직자기기록 채널에서 잡음 필터는 유색 잡음을 줄여준다. 채널 검출기로 SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm)와 Bahl 등이 제안한 BCJR 알고리즘을 사용했으며 외부 오류정정부호로는 Sum-product 알고리즘으로 구현한 LDPC (Low Density Parity Check) 부호를 사용했다. 잡음 필터의 유무, 지터 잡음별, LDPC 부호의 크기별로 실험하였다. LDPC 부호는 부호율이 0.94인 0.5Kbyte (4336, 4096) LDPC 부호를 사용했고 다른 하나는 부호율이 0.97인 1Kbyte (8432, 8192) LDPC 부호를 사용하였다.

**Key Words** : Perpendicular Magnetic Recording Channel, Noise Predictive, Turbo equalization

ABSTRACT

We introduce a noise-predictive turbo equalization using noise filter in perpendicular magnetic recording(PMR) channel. The noise filter mitigates the colored noise in high-density PMR channel. In this paper, the channel detectors used are SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm) and BCJR algorithm which proposed by Bahl et al., and the outer decoder used is LDPC (Low Density Parity Check) code that is implemented by sum-product algorithm. Two kinds of LDPC codes are experimented. One is the 0.5Kbyte (4336,4096) LDPC code with the code rate of 0.94, and the other is 1Kbyte (8432,8192) LDPC code with the code rate of 0.97.

### I. 서론

지금 사용하고 있는 하드디스크는 수직자기기록 채널을 사용하고 있으며 용량 증대를 위해서는 밀도를 더욱 높여야 한다. 하지만 밀도를 높이면 인접 신호간 간섭(ISI)이 커져서 신호검출에 어려움을 겪게 된다. 현재 데이터 검출은 잡음 예측 최대 유사도(Noise Predictive Maximum Likelihood, NPML) 방법을 사용하고 있다. NPML은 비터비 검출기에 잡음 예측 방법을 이용하여 유색잡음을 백색 잡음화

하여 성능 이득을 얻는 기법이다<sup>[1]</sup>. 하지만 고밀도의 수직자기기록 채널에서는 NPML 기법만으로는 좋은 성능을 얻기 힘들고 또한 비선형 잡음을 고려한다면 성능이 더욱 안 좋게 된다. 수직자기기록 채널에서 비선형 잡음이 일어나는 요인에는 여러 가지가 있는데 주된 요인중의 하나가 제 위치에서 천이가 안되고 앞뒤로 이동해서 천이가 일어나는 경우이다. 본 논문에서는 이러한 잡음 상황을 모델링하여 실험하였다.

오류정정부호에서 반복 복호 기법은 많은 통신 시

\* 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

\* 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실 (kijyou@paran.com), (zlee@ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-05-209, 접수일자 : 2008년 5월 13일, 최종논문접수일자 : 2008년 9월 17일

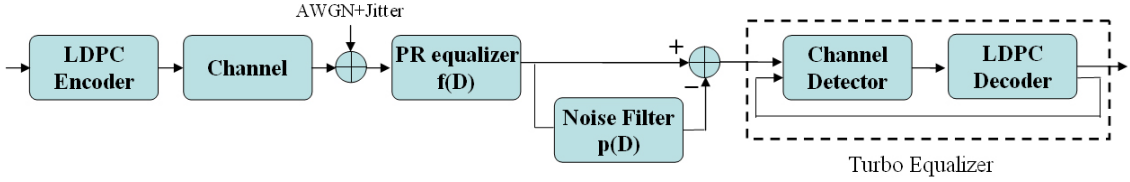


그림 1. 전체 시스템의 블록 다이어그램

스텝에서 좋은 성능 향상을 가져왔다. 이러한 부호를 차세대 자기기록 채널에 적용하기 위해 많은 연구가 진행되었다. 특히 수직자기기록 채널처럼 메모리가 있는 채널, 즉 인접 심볼간 간섭(Inter Symbol Interference, ISI)가 존재하는 채널의 경우 터보 등화기 구조를 이용하면 더 좋은 성능을 낼 수 있다<sup>2)</sup>. 본 논문에서는 NPML에서 사용하는 잡음 예측 기법을 터보 등화기 구조에 적용하였다.

터보 등화기를 다음과 같은 구조로 하였다. 채널 검출기로는 NPML대신 SOVA (Soft Output Viterbi Algorithm)와 MAP (Maximum A-posteriority Probability) 알고리즘인 BCJR 알고리즘을 Log 영역에서 구현하였다. 오류정정부호로는 LDPC (Low Density Parity Check) 부호를 사용하였다.

본 논문의 실험은 잡음 필터의 유무, 지터 잡음별, LDPC 부호의 크기별로 진행되었다. 구체적인 실험 방법은 그림 1과 같다.

## II. 수직자기기록 채널

### 2.1 수직자기기록 채널

수직자기기록 채널에서의 읽기 헤드는 일정한 자기 극성 범위의 출력값을 읽어들이는 고립천이 응답은 다음과 같이 모델링 된다.

$$g(t) = A \times \tanh\left(\frac{2t}{0.579\pi \times T_{50}}\right) \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 최대값의 크기이고,  $T_{50}$ 은  $g(t)$ 가  $-A/2$ 에서  $+A/2$ 로 되는데 걸리는 시간이다. 기록밀도는  $K(=T_{50}/T_b)$ 이고  $T_b$ 는 비트 간격이다. 수직자기기록 채널에서의 잡음은 AWGN과 지터 잡음인 미디어 잡음이 섞여서 생긴다<sup>3)</sup>.

### 2.2 신호 대 잡음비

신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio, SNR)는 다음과 같이 정의하였다.

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{A^2}{\sigma_w^2 + \sigma_j^2 \|g'(t)\|^2} \right)$$

여기서  $\sigma_w^2$ 은 AWGN의 잡음 전력이다. 본 논문에서는 AWGN과 지터 잡음의 비율을 70:30, 50:50, 20:80으로 바꿔가면서 실험하였다.

### 2.3 채널 모델링

수직자기기록 채널은 잡음이 있는 일반적인 통신 채널과 비슷하다. 채널을 통과한 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서  $a_k$ 는 입력 데이터,  $h(t)$ 는 임펄스 응답 신호,  $\Delta_k$ 는 가우시안 분산 랜덤 변수,  $n(t)$ 는 AWGN이다.  $h(t)$ 는 이중비트 응답이라고도 하며

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

로 표현할 수 있다.

## III. 등화기 및 잡음 필터

### 3.1 부분 응답 등화기

수직자기기록 채널은 ISI가 존재하는 채널이다. 즉 메모리가 존재하는 채널로서 등화기를 이용하여 우리가 원하는 형태로 등화를 시킬 수 있다. 여기서는 수직적인 채널을 사용하므로 이상적인 부분응답 형태인 PR(12321)을 사용했다. 여기서 PR (Partial Response) 이란 부분응답이고 12321은 타겟이며 메모리가 5개이고 각각의 계수가 1, 2, 3, 2, 1을 의미한다. 등화기는 출력값과 타겟 응답값의 MSE (Mean-Square-Error)를 최소화 되도록 하였다. 그리고 이것은 구현이 간단한 LMS (Least Mean Square) 알고리즘으로 구현하였다. 여기서 타겟은  $f(D)$ 로, 다항식 형태로 표현할 수 있다.

### 3.2 잡음 필터

등화기를 거친 신호는 부분응답신호와 유색잡음이 추가된 형태로 볼 수 있다. 이 유색잡음은 잡음 필터를 사용하면 백색 잡음화 되면서 잡음 전력을 줄일 수 있다. 잡음 필터는 또한 FIR 필터이고  $N$ 개의 계수를 가지는 다항식  $p(D)$ 로 정의한다. 잡음 필터의 계수는 MSE를 최소값으로 가지도록 결정된다. 그러면 채널 응답은 Generalized Partial Response (GPR) 다항식 형태가 된다. 이를

$$g(D) = f(D)(1 - p(D))$$

과 같이 표현한다.

본 논문에서는 기존 터보 등화기에 잡음 필터를 사용하여 잡음 예측 터보 등화기를 구현하였다. 채널을 4차의 다항식으로 하였고 잡음 필터도 4차의 다항식으로 하였다. 그러므로 채널 검출기는 8차의 다항식으로 복호해야 하므로 더 복잡해진다.

## IV. 잡음 예측 터보 등화기

기존 NPML에서 사용하던 채널 검출기는 비터비 검출기로 경관정값을 출력으로 내보낸다. LDPC 부호는 확률값을 반복하여 주고받음으로서 오류를 정정하는 부호로 확률값인 연관정값을 입력으로 받으면 성능이 좋아진다. 그러므로 비터비 검출기로는 한계가 있고, 연관정값을 출력으로 하는 SOVA나 MAP 알고리즘의 일종인 BCJR 알고리즘이 채널 검출기로 더 좋다.

터보 등화기는 채널 검출기와 오류 정정 부호를 반복적으로 복호하므로써 성능을 최대한으로 끌어올리는 것이다<sup>4)</sup>. 여기에 잡음 필터를 사용하여 잡음을 예측한다면 유색잡음이 많은 경우에는 성능이 더욱 좋다.

### 4.1 채널 검출기

SOVA는 비터비 알고리즘을 수정하여 만든 알고리즘으로 경관정 출력값에 확률값을 더한다<sup>5)</sup>. 확률값은 경로상에서 경로값의 차이를 말한다. SOVA는 비터비 알고리즘과 비교하여 복잡도가 비슷하므로 구현하기가 쉽다.

1974년 Bahl 등에 의해 제안된 BCJR 알고리즘은 MAP 알고리즘의 일종이다. MAP 알고리즘은 사전 확률, 채널정보, 사후정보를 이용하여 확률값을 출력으로 내보낸다. SOVA가 두개의 경로를 비교한다면

MAP 알고리즘은 모든 경로에 대해 비교한다. 그리고 모든 경로에 대해 곱셈 계산을 하는데 이를 Log 영역에서 구현하면 곱셈이 덧셈으로 바뀌므로 계산이 편리해진다.

반복 복호를 할 때 사전정보를 받게 되는데 이를 경로 가지값을 구할 때 사용하게 되면 성능이 더욱 좋아지고 더 믿을만한 확률값을 내보내게 되어 전체적인 성능이 좋아진다.

### 4.2 LDPC 부호

LDPC 부호는 반복 복호하는 기법으로 현재 많은 연구가 진행중인 부호이다. 블록 부호의 일종으로 패리티 검사 행렬을 이용한 체크노드와 비트노드를 가지고 반복 복호한다. 이 부호는 부호화가 어려운 반면에 복호화는 쉬운 특징이 있다. 부호화가 어렵기 때문에 쉽게 부호화 할 수 있는 것이 연구가 진행되었는데 그중에 하나가 구조적 LDPC 부호이다<sup>6)</sup>. 이는 커다란 패리티 검사 행렬을 작은 몇 개의 정방행렬로 나누어 구현하는 방법이다. 본 논문에서 사용한 패리티 검사행렬은 열무게가 3이고 랜덤하게 만들었다<sup>7)</sup>. 복호는 메시지 전달 알고리즘을 이용한 Sum-product 알고리즘으로 구현하였다<sup>8)</sup>.

## V. 실험 결과 비교

실험은 다음과 같이 진행하였다. 기본적인 실험 환경은 표 1과 같다. 고밀도로 용량증대 효과를 보기위해선 높은 부호율로 성능을 내야 한다. 따라서 LDPC 부호의 부호율은 0.94 이상을 사용했다. 잡음 필터의 차수가 4차 이상부터 성능이 비슷하므로 4차의 FIR 필터를 사용하였다<sup>11)</sup>. 실제와 비슷한 환경을 위해 지터 잡음을 80%로 하였다. 잡음 필터를 사용했을 때와 잡음 필터를 사용하지 않았을 때의 성능 비교를 하였고 터보등화기에서 반복 복호를 하였을 경우 어느 정도의 성능이득이 있는지, 지터 잡음의

표 1. 기본적인 실험 환경

0.5Kbyte LDPC 부호	(4336, 4096) R(부호율)=0.94
1Kbyte LDPC 부호	(8432, 8192) R=0.97
PR 타겟	PR(12321)
잡음 필터	4차 다항식의 FIR 필터
잡음 환경	AWGN 20%, 지터 잡음 80%
SNR 범위	22dB ~ 30dB
채널 밀도	1.7/R
반복 횟수	LDPC 20회, 채널반복 2회

정도에 따라 성능비교를 하였고 마지막으로 LDPC 부호의 크기에 따라 비교하였다.

### 5.1 NPML, TE, NP-TE의 복잡도 비교

SOVA는 NPML에 비해 복잡도가 2배, Log-MAP은 복잡도가 4정도 크다. 거기에 잡음 필터를 적용하면 4차에서 8차의 복잡도를 가져야 하므로 없는 것에 비해 16배 정도 복잡해진다. 하지만 이는 무선통신환경을 본다면 충분히 적용 가능한 복잡도이다. 0.5Kbyte LDPC부호의 복잡도에 비해 1Kbyte LDPC 부호의 복잡도는 약 3배정도 복잡하다. TE에서 한번의 반복 복호로 인해 복잡도는 NPML에 비해 10배 이상으로 커질 수 있지만 LDPC 부호의 중단 알고리즘에 의해 높은 SNR에서는 10배 이하로 더 낮아질 수 있다. NP-TE는 TE에 비해 약 2배 이하로 차이 난다고 볼 수 있다. 이는 LDPC 부호의 복잡도가 잡음필터를 적용함으로써 늘어나는 복잡도에 비해 높기 때문이다.

### 5.2 잡음 필터의 성능 비교

그림 2와 그림 3은 각각 잡음 필터의 유무에 따라 BER (Bit Error Ratio), SER (Sector Error Ratio) 성능 결과를 보여준다. 여기서의 터보 등화기(TE)는 SOVA+LDPC 부호와 Log-MAP+LDPC 부호 두 가지로 하였다. BER이  $10^{-5}$ 에서 보면, 채널 반복 복호를 안하였을 때는 SOVA를 사용한 잡음 예측 터보 등화기(NP-TE) 구조가 SOVA를 사용한 (TE) 구조보다 약 3.8dB 정도 좋다. 채널 반복 복호를 2회 하였을 때는 2.8dB 정도 좋다. Log-MAP을 사용하였을 때 더 좋은 성능을 낸다. 하지만 채널 반복 복호

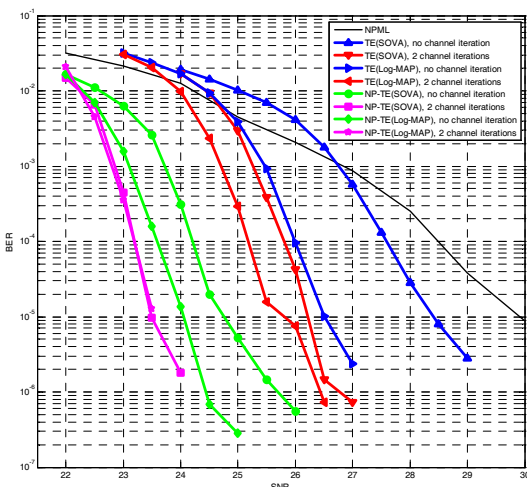


그림 2. 잡음 필터별 BER 성능

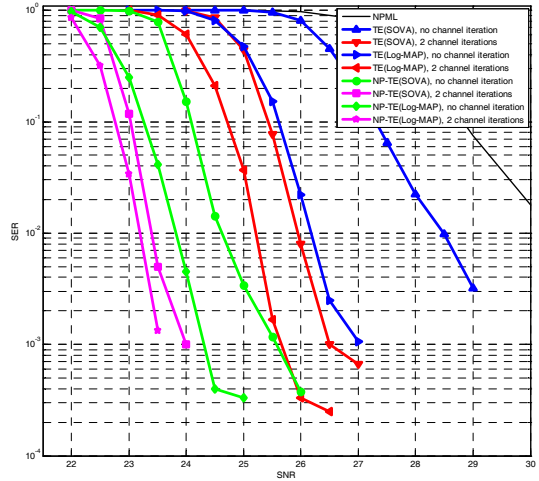


그림 3. 잡음 필터별 SER 성능

를 2번 하였을 때는 성능이 비슷한 것을 볼 수 있다. 특히 NP-TE에서는 성능이 거의 똑같다. SER의 경우  $10^{-3}$ 에서 보면, 성능이 SOVA를 사용한 NP-TE 구조가 채널 반복 복호를 안했을 때는 4dB 정도, 채널 반복 복호를 하였을 때는 2.5dB 정도 SOVA를 사용한 TE보다 좋다. 채널 반복 복호를 할 경우 Log-MAP을 사용할 경우가 SOVA보다 약간의 성능이득이 있다.

### 5.3 지터 잡음별 성능 비교

그림 4와 그림 5는 각각 지터 잡음별 BER, SER 성능 결과를 보여준다. TE는 SOVA+ LDPC 부호로 하였고 지터 잡음을 0%, 30%, 50%, 80%로 바뀌가면서 실험하였다. NP-TE 구조가 지터 잡음이 많을 수록 성능이 더 좋은 것을 볼 수 있다. BER이  $10^{-5}$

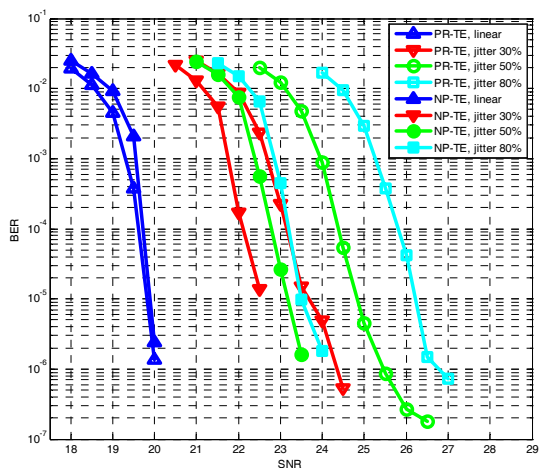


그림 4. 지터 잡음별 BER 성능

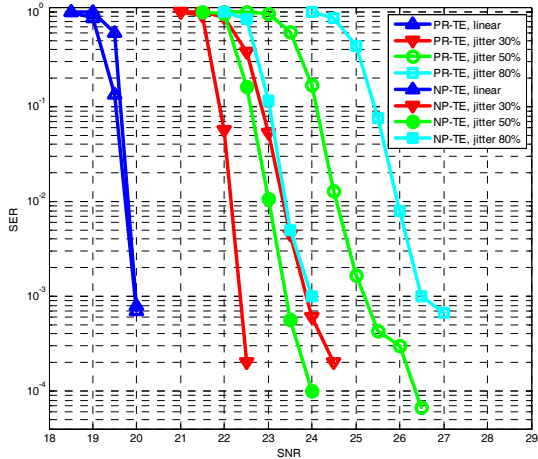


그림 5. 지터 잡음별 SER 성능

에서 보면, 지터 잡음이 없는 선형의 시스템인 경우 두 시스템이 비슷한 성능을 보인다. 오히려 NP-TE 구조가 성능이 약간 안좋다. 하지만 지터 잡음이 있는 비선형의 경우는 성능 차이가 확연히 난다. NP-TE 구조가 TE 구조보다 지터 잡음이 30%일 경우 약 1dB, 50%일 경우 1.6dB, 80%일 경우 2.6dB 정도 성능이 더 좋다. SER의 경우  $10^{-3}$ 에서면, BER의 성능 격차와 비슷하거나 약간 더 좋다.

5.4 LDPC 부호의 블록크기별 성능 비교

그림 6과 그림 7은 각각 LDPC 부호의 크기별 BER, SER 성능을 보여준다. 여기서도 TE는 SOVA+LDPC 부호로 하였다. 여기서는 크기가 서로 다른 LDPC 부호의 경우 터보 등화기 구조에 어떠한 영향을 미치는지 확인한다. LDPC 부호는 패리티 수는 같고 메시지 길이가 다른 것의 두 배인 부호를

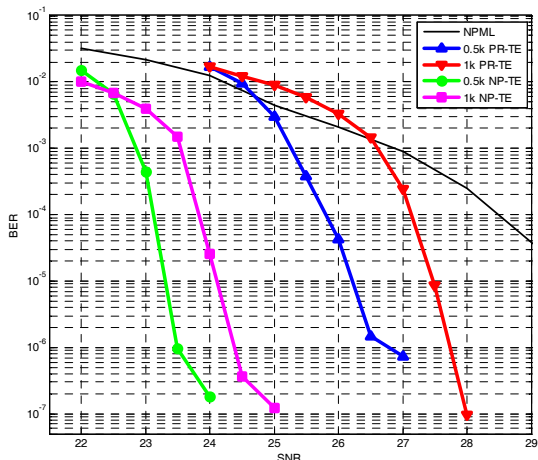


그림 6. LDPC 부호의 크기별 BER 성능

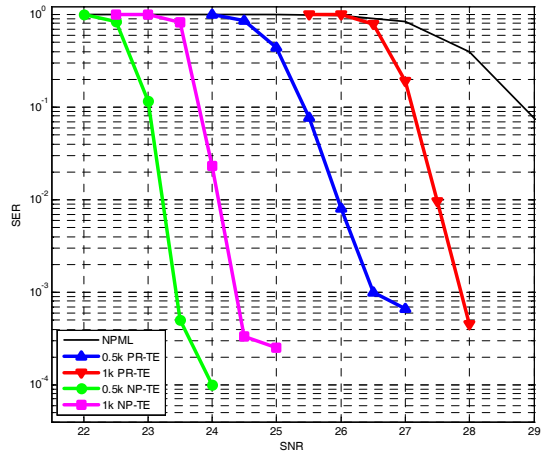


그림 7. LDPC 부호의 크기별 SER 성능

사용했다. BER이  $10^{-5}$ 에서 보면, 0.5Kbyte LDPC 부호와 1Kbyte LDPC 부호가 약 1dB 정도 성능 차이가 난다. PR-TE와 NP-TE는 둘다 약 3dB 정도 성능 차이가 난다.

VI. 결 론

수직자기기록 채널에서 잡음 필터의 유무, 지터잡음, LDPC 부호의 크기별로 실험하였다. 우선 TE 구조로 반복 복호하면 더 큰 성능이득을 얻는 것을 보았고, 지터 잡음이 많을수록 NP-TE 구조가 더 좋은 성능이득을 얻는 것을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. D. Coker, E. Eleftheriou, R. L. Galbraith and W. Hirt, "Noise-predictive maximum likelihood (NPML) detection," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.34, No.1, pp.110-117, Jan. 1998.
- [2] M. Tuchler, R. Koetter and A. C. Singer, "Turbo equalization: Principles and new results," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.50, No.5, pp.754-767, May 2002.
- [3] Y. Nishida et al., "Noise characteristics of double-layered perpendicular media," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol.235, pp.454-458, 2001.
- [4] R. Koetter, A. C. Singer and M. Tuchler, "Turbo equalization," *IEEE signal Processing Magazine*, Vol.21, pp.67-80, Jan. 2004.
- [5] J. Hagenauer and P. Robertson, "Iterative

(TURBO) decoding of systematic convolutional codes with the MAP and SOVA Algorithms,” *ITG- Fachberichte*, Vol.130, pp.21-29, 1995.

- [6] T. J. Richardson and R. L. Urbanke, “Efficient Encoding of Low-Density Parity-Check Codes,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.47, No.2, Feb. 2001.
- [7] S. Hongwei, L. Jingfeng and B. V. K. V. Kumar, “Concatenated low density parity check codes for magnetic recording channels,” *INTERMAG 2003*, pp.DT-12, Apr. 2003.
- [8] F. R. Kschischang, B. J. Frey and H.-A. Loeliger, “Factor graphs and the sum-product algorithm,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.47, No.2, pp.498-519, Feb. 2001.

김진영 (Jinyoung Kim)

준회원



2007년 2월 숭실대학교 기계공학과 학사  
 2007년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사과정  
 <관심분야> 스토리지 시스템, 반복 복호 부호, 채널코딩

이재진 (Jaejin Lee)

중신회원



1983년 2월 연세대학교 전자공학과 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~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수  
 <관심분야> 통신이론, 채널코딩, 기록저장 시스템