

런-길이 제한 부호를 패리티로 사용한 연판정 LDPC 부호의 수직자기기록 채널 성능

김진영*, 이재진^o

Performance of Run-length Limited Coded Parity of Soft LDPC Code for Perpendicular Magnetic Recording Channel

Jinyoung Kim*, Jaejin Lee^o

요 약

본 논문에서는 수직자기기록 저장장치에서 사용되는 LDPC 부호의 패리티 부분을 (1, 7) 런-길이 제한 부호로 사용할 때, 연판정 값을 입력으로 한 경우의 성능을 조사한다. 사용자 데이터는 최대 천이 런(maximum transition run) 부호로 인코딩된다. 부호율의 손해를 최소화 하기 위하여 LDPC 부호의 패리티에만 (1, 7) 런-길이 제한 부호를 적용한다. 본 논문에서는 성능 향상을 위하여 사용자 데이터 부분에 대하여만 연판정 출력 비터비 알고리즘(soft output Viterbi algorithm, SOVA)을 사용한다. SOVA를 사용한 경우의 성능은 26dB 보다 작은 신호대잡음 비에서 좋게 나타난 것에 반하여 26dB 보다 높은 신호대잡음비에서는 나쁘게 나타났다. 이것은 높은 지터 잡음과 LDPC 디코더에 두 가지 다른 형태의 입력에 기인한다.

Key Words : high density recording channel, low density parity check codes, maximum transition run codes, perpendicular magnetic channel, run-length limited codes.

ABSTRACT

We propose soft user data input on LDPC codes with parity encoded by the (1, 7) run length limited (RLL) code for perpendicular magnetic recording channel. The user data are encoded by maximum transition run (MTR) (3;11) code. In order to minimize the loss of code rate, the (1, 7) RLL code only encode the parity of LDPC. Also, to increase performance, we propose only user data part applied soft output Viterbi algorithm (SOVA). The performance using the SOVA showed good performance lower than 26 dB. In contrast, it showed worse performance high than 26 dB. This is because of incorrect soft information by high jitter noise and two different input types for LDPC decoder.

1. 서 론

저장할 정보의 양이 기하급수적으로 많아짐에 따라 아주 높은 기록 밀도를 갖는 저장장치가 필요하다. 하지만, 기록 밀도가 높아질수록 저장된 데이터

의 신뢰도는 떨어지게 되며, 이에 따라 데이터 복원 기술의 복잡도는 훨씬 늘어난다. 이에 복구된 데이터의 신뢰도를 향상시키기 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다¹⁻⁶⁾. 이 가운데 한 방법으로 변조부호를 꼽을 수 있는데, 최대 천이 런(maximum

※ 본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020262).

• 주저자 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실, 정희원

o 교신저자 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2013-09-406, 접수일자 : 2013년 9월 15일, 최종논문접수일자 : 2013년 9월 26일

transition run, MTR) 부호와 런-길이 제한(run-length limited, RLL) 부호가 그 대표적인 예이다^{7,8)}. 데이터 저장장치에서 변조부호는 중요한 역할을 한다. 먼저 변조부호는 입력되는 사용자 데이터를 기록 채널의 특성에 맞도록 재구성한다. 그리고 신호의 정확한 샘플링 시간을 획득하는데 도움을 준다. 이러한 변조부호 덕분에 신호검출 성능이 향상된다. (d, k) RLL 부호는 데이터열에서 나타나는 1과 1의 사이에 0의 수를 최소 d 개와 최대 k 개로 제한하는 부호이다. d 조건은 인접한 심볼간 간섭(intersymbol interference, ISI)을 줄이는 역할을 하는 것이며, k 조건은 정확한 샘플링 시간의 획득(timing recovery)을 위한 것이다. 한편, 자기기록 채널로부터 재생된 전기 신호는 연속적인 최소 천이(transition)가 많아질수록 진폭이 감소되며, 이에 따라 출력 신호의 신호 품질이 저하된다. MTR 부호는 이러한 연속적인 최소 런이 어느 횟수 이상 일어나지 않도록 하는 부호이다. 따라서 MTR $(j; k)$ 부호는 한 심볼 길이(1T)의 연속적인 천이 횟수를 최대 j 번 까지 허용하며 최대 런-길이는 k 로 제한하는 부호이다. 높은 부호율 때문에 수직자기기록장치에서는 RLL 부호 대신 MTR 부호를 채택하고 있다. 본 논문에서는 부호율이 16/17인 MTR (3; 11) 부호를 고려한다^{7,9,10)}. 이것은 1T 신호가 최대 3회까지 발생할 수 있으며 샘플링 신호 획득 길이가 11로 굉장히 길다. 비교 대상으로, 부호율 2/3인 (1, 7) RLL 부호를 사용한다. (1, 7) RLL 부호는 1T 신호가 전혀 생기지 않도록 하며 샘플링 신호 획득의 길이가 7로 비교적 짧아서 신호의 품질을 향상시키나, MTR 부호에 비해 부호율이 낮은 단점이 있다.

최근 들어, 자기기록저장장치에 LDPC (low density parity check) 부호가 적용되고 있다¹¹⁻¹⁵⁾. LDPC 부호는 체계적(systematic)인 부호이기 때문에 인코딩된 후에도 사용자 데이터의 배열은 변하지 않는다. 그러므로 MTR이나 RLL 부호로 인코딩된 사용자 데이터는 LDPC 부호로 인코딩된 후에도 똑같이 제한 조건들을 유지한다. 반면, PDPC 부호의 패리티는 이러한 제한 조건들에 맞지 않는다. 따라서, LDPC 부호의 패리티 부분을 제한 조건으로 만족하도록 MTR이나 RLL 부호로 인코딩해야 한다.

데이터를 읽어내는 과정에서는 LDPC 복호기 다음으로 변조부호 복호기를 거쳐서 사용자 데이터가 복원되기 때문에, 패리티 부분은 LDPC 디코딩 전에 이미 변조부호가 디코딩되어 있어야 한다. 본 논

문에서는 MTR (3; 11) 부호를 MTR 부호라 하고, (1, 7) RLL 부호를 17RLL이라 한다. 이전의 연구에서, LDPC 부호의 성능을 향상시키고 부호율 손해를 최소화 하기 위하여 사용자 데이터 부분은 MTR 부호로 인코딩 하고 패리티 부분은 17RLL 부호로 인코딩한 구조를 제안하였다¹⁶⁾. 본 논문에서는 수직자기기록장치를 위한 LDPC 부호의 입력인 사용자 데이터를 연판정 값으로 하고 패리티를 17RLL 부호화 하는 구조를 제안하고 그 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수직자기기록 채널의 모델을 간단히 설명하고, 3장에서 연판정 입력 데이터를 갖는 LDPC 부호 알고리즘의 구조를 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 환경과 결과를 설명하며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 수직자기기록 채널 모델

수직자기기록 채널에서 신호는 자성이 일정한 영역에서 발생하며, 자성이 변하는, 즉 극성이 바뀌는 곳에서는 영 볼트의 출력을 가지게 된다. 한 번 천이(single-transition)하는 계단응답(step response)은 다음과 같은 식으로 근사화 할 수 있다¹⁷⁾.

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

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 기록 비트 간격이다. 수직자기기록 채널에서의 잡음은 백색 부가 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)과 지터 잡음인 미디어 잡음이 더해진 모양으로 모델링 할 수 있다. 지터 잡음을 위하여 각 자성 천이에 랜덤 가우시안 분포를 갖는 시간 지연을 적용하고, 1차 근사식으로 시간 지연 계단 응답을 표현하면

$$g(t+\Delta) \approx g(t) + \Delta g'(t) \quad (2)$$

가 되어, 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$SNR = 10 \log_{10} \left\{ \frac{A^2}{\sigma_w^2 + \sigma_j^2 \|g'(t)\|^2} \right\} \quad (3)$$

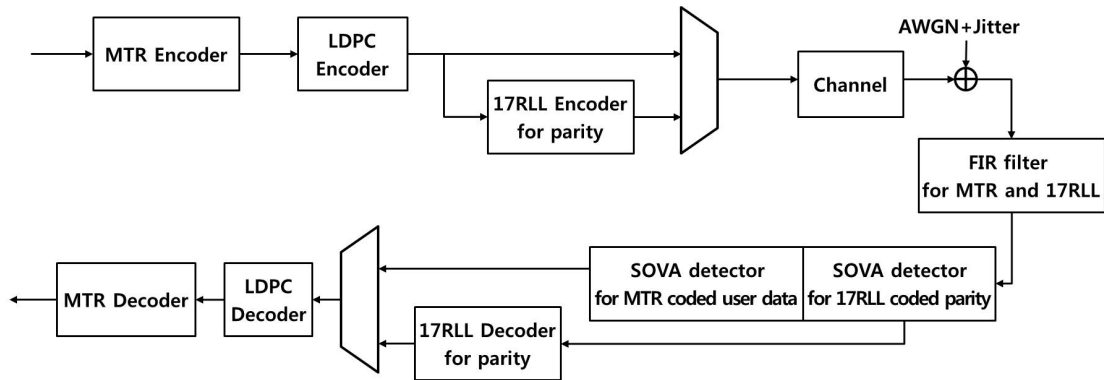


그림 1. 패리티 부분을 17RLL 부호로 인코딩하는 LDPC 부호 디코딩 과정 블록도.
Fig. 1. Block diagram of LDPC codes with parity encoded by 17RLL code.

여기서 σ_w^2 은 AWGN의 잡음 전력이고, σ_j^2 은 Δ 의 분산이다.

수직자기기록 채널은 잡음이 있는 일반적인 통신 채널과 비슷하여, 채널을 통과한 신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h(t - kT + \Delta_k) + n(t) \quad (4)$$

$$h(t) = g(t) - g(t - T) \quad (5)$$

여기서 a_k 는 입력 데이터, $h(t)$ 는 임펄스 응답 신호, Δ_k 는 가우시안 분산 랜덤 변수, $n(t)$ 는 AWGN이다. $h(t)$ 는 이중비트 응답이다.

III. 연판정 입력 데이터의 LDPC 부호화 구조

연판정 출력 비터비 알고리즘(soft output Viterbi algorithm, SOVA)는 비터비 검출기를 이용하여 연판정 값은 출력하는데, MTR과 17RLL을 포함한 대부분의 변조부호들은 경판정 값을 출력하는 것보다 연판정 값을 출력하기가 훨씬 더 어렵다. 따라서 복잡도를 줄이면서 성능을 향상시키는 방안으로 패리티를 제외하고는 SOVA 출력을 입력으로 하는 LDPC 부호 디코딩 구조를 제안한다. 그림 1은 본 논문에서 제안하는 SOVA를 사용한 패리티를 17RLL로 인코딩한 LDPC 부호의 디코딩 알고리즘의 블록도이다. 데이터의 흐름을 살펴보면, 먼저 입력된 사용자 데이터는 MTR 인코더를 통과하여 LDPC 부호 인코더를 지난다. 이 때 출력된 패리티 부분은 MTR 조건을 만족하지 못한다. 기존의 자기

기록장치에서는 이 패리티 부분을 MTR 부호로 인코딩 하여 사용한다. 본 논문에서는 고밀도에서 MTR 인코딩된 신호의 품질이 나빠짐을 고려하여 17RLL 부호로 인코딩 한다. 이렇게 되면 결과적으로 사용자 데이터는 MTR 부호로, 패리티 부분은 17RLL 부호로 각각 인코딩 되어 채널을 통과하게 된다. 복호 과정에서는 먼저 FIR 필터인 등화기를 통과하고 SOVA를 통과한다. 이 때, 사용자 데이터 부분은 MTR 구조에 적합한 모양의 SOVA를 거치고, 패리티 부분은 17RLL 구조에 적합한 SOVA를 지나간다. 이후 패리티 부분만 17RLL 디코딩을 한 후, 사용자 데이터와 함께 LDPC 부호 디코더를 통과시켜서 오류정정을 하고, 최종적으로 MTR 디코더를 이용하여 사용자 데이터를 복원한다.

IV. 모 의 실험

4.1. 모의 실험 조건

모의 실험을 위한 수직자기기록 채널은 80%의 지터 잡음과 20%의 AWGN으로 가정하였다. 비선형 효과를 나타내도록 하기 위하여 채널의 출력신호 전력은 10%까지 변할 수 있도록 하였다. 사용자 데이터의 밀도(user bit density, UBD)는 1.4로 하고, (4336, 4096) LDPC 부호를 사용한다. 사용된 LDPC 부호는 열-무게(column weight)가 3인 조건으로 랜덤하게 생성된 패리티 검사 행렬을 이용한다. LDPC 부호의 복호기는 메시지 전달 알고리즘(message-passing algorithm)을 기반으로 하는 합곱 알고리즘(sum-product algorithm)으로 구현되었으며, 최대 반복 복호 횟수는 20회이다. 그리고 채널 타겟은 PR(12321)을 적용하였다.

여기서 순수 사용자 데이터는 3856 비트인데 MTR 부호화를 거치면 4097비트가 된다. 이중 4096비트를 LDPC 부호화 하고 남은 1비트를 그냥 채널로 흘려보낸다고 가정하면 LDPC 부호의 패리티는 240비트이므로 17RLL 부호화 후에는 360비트가 된다. 따라서 전체적인 부호율은 $3856/4457=0.865$ 이며, 채널 비트 밀도(channel bit density, CBD)는 약 1.618이 된다.

4.2. 모의 실험 결과

그림 2는 MTR 부호화된 사용자 데이터와 17RLL 부호화된 패리티 데이터의 비트오류율(bit error rate, BER) 성능을 보여주고 있다. 수직자기기록 채널에서 17RLL 부호화된 패리티 부분이 MTR 부호화된 사용자 데이터 보다 좋은 성능을 보인다. 이것은 $d=1$ 이란 조건이 의미가 있음을 알 수 있다. 하지만 17RLL 복호기의 오류 전과 특성으로 인해 패리티 부분에서 17RLL 디코딩 후의 BER 성능에 약간의 열화가 있음을 보여준다. 그림 3은 경판정 출력을 하는 비터비 검출기와 연관정 출력을 하는 SOVA와의 BER 성능을 비교하고 있다. 복조를 하는 동안, MTR 부호화된 사용자 데이터는 오류 전과 현상을 보인다. SOVA 검출기를 사용한 BER이 비터비를 사용한 경우보다 훨씬 우수하다.

그림 4는 비터비 검출기와 SOVA 검출기의 섹터 오류율(sector failure rate, SFR) 성능을 비교한다. SFR 성능에서는 BER 성능과 다른 결과를 보인다. SOVA 검출기를 사용한 경우의 SFR이 비터비 검출기를 사용한 경우보다 26dB 까지는 우수하나, 그 이후로는 비터비 검출기의 성능이 더 우수하다. 높은 SNR에서는, SOVA 검출기로부터 나오는 연관정 값이 부정확한 정보를 가지고 있다면 LDPC 디코딩 과정에서 경판정 값보다 안좋은 영향을 미칠 수 있다. 그림 5가 SOVA 검출기 출력의 로그 유사도율(log likelihood ratio, LLR) 분포를 23dB와 29dB 경우에 대하여 보여주고 있다. 만일 LLR이 아주 높거나 아주 낮으면 다른 값들보다 LDPC 복호기에 더 강력한 영향력을 미치게 된다. SNR이 29dB인 경우가 23dB인 경우보다 LLR 값이 아주 크거나 아주 작은 빈도가 높음을 볼 수 있다. 이러한 경우 큰 지터 잡음은 부정확한 정보를 만들어내게 된다. 따라서 높은 SNR에서도 좋은 성능을 갖기 위해서는 17RLL 디코딩 후 나오는 (패리티 데이터) 경판정 값과 SOVA 출력의 연관정 (사용자 데이터) 값을 잘 조정해야 한다.

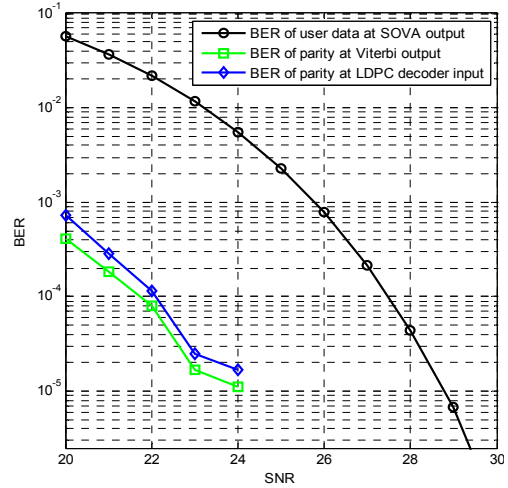


그림 2. 사용자 데이터와 패리티의 BER 성능
Fig. 2. BER of user data and parity detector.

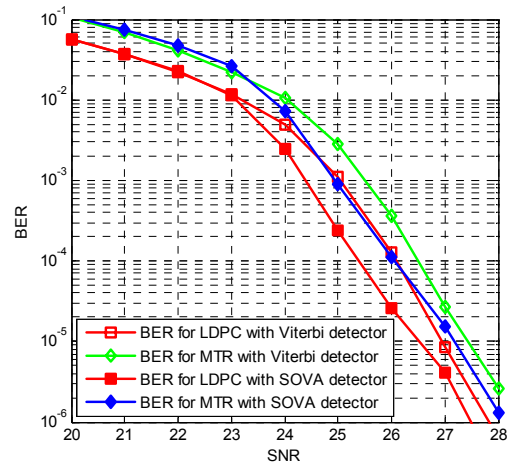


그림 3. SOVA와 비터비 검출기의 BER 성능
Fig. 3. BER of SOVA and Viterbi detector.

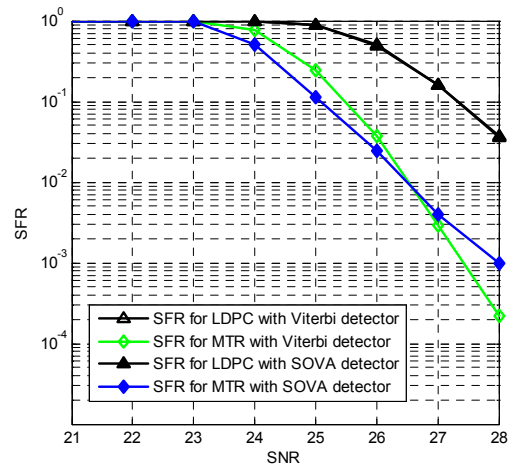


그림 4. SOVA와 비터비 검출기의 SFR 성능
Fig. 4. SFR of SOVA and Viterbi detector.

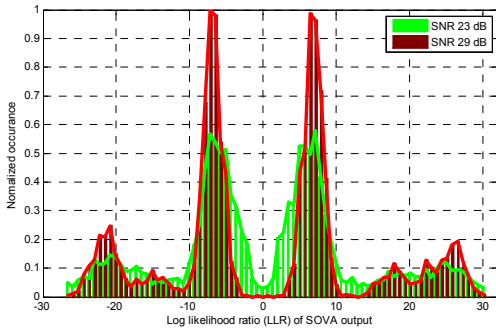


그림 5. 23dB와 29dB에서 SOVA 출력 LLR 분포
 Fig. 5. Histogram of log likelihood ratio (LLR) of SOVA output at 23 and 29 dB.

V. 결 론

본 논문에서는 수직자기기록 채널에서 LDPC 부호의 패리티 부분을 17RLL 부호화 하고, LDPC 부호기의 입력으로 17RLL 디코딩된 패리티 부분과 연관정 (사용자 데이터) SOVA 출력값을 사용하는 신호 검출기 구조를 제안하였다. BER 성능은 SOVA 검출기를 사용한 경우가 성능이 우수하였다. 하지만 SFR의 경우에는 낮은 SNR에서 연관정 값을 출력하는 SOVA가 우수한 성능을 보이지만 높은 SNR에서는 경관정 값을 출력하는 비터비 검출기가 우수하였다. 이는 큰 지터 잡음에 의한 부정확한 연관정 정보 때문으로 추측할 수 있다. 높은 SNR에서 좋은 성능을 갖기 위하여, 연관정 정보의 신뢰도를 높여야 한다.

References

[1] N. Fujiwara, K. Shinagawa, K. Ashiho, K. Fujiwara, and N. Takahashi, "Development of 3-D read/write simulation system for higher areal recording density," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 2, pp. 838-841, Mar. 2004.

[2] M. Igarashi, M. Hara, A. Nakamura, Y. Hosoe, and Y. Sugita, "High-density perpendicular recording media with large grain separation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 2, pp. 549-554, Feb. 2005.

[3] M. Hashimoto, N. Ito, H. Kashiwase, T. Ichihara, H. Nakagawa, and K. Nakamoto, "Analysis of relation between magnetic cluster size distribution and signal quality for high-density recording," *IEEE Trans. Magn.*,

vol. 46, no. 6, pp. 1576-1579, June 2010.

[4] I. Demirkan and Y. X. Lee, "The combined constraints for perpendicular recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 2, pp. 220-225, Feb. 2006.

[5] N. Mysore and J. Bajcsy, "Reduced complexity signal detection and turbo decoding for multitrack magnetic recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 10, pp. 2974-2976, Oct. 2005.

[6] J. Lu and J. M. F. Moura, "Structured LDPC codes for high-density recording: large girth and low error floor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 2, pp. 208-213, Feb. 2006.

[7] T. Nishiya, K. Tsukano, T. Hirai, S. Mita, and T. Nara, "Rate 16/17 maximum transition run (3;11) code on an EEPML channel with an error-correcting postprocessor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 5, pp. 4378-4386, Sep. 1999.

[8] E. Yamada, T. Iwaki, and T. Yamaguchi, "Turbo decoding with run length limited code for optical storage," *Japanese J. Applied Physics*, vol. 41, no. 3B, pp. 1753-1756, Mar. 2002.

[9] T. Kanaoka and T. Morita, "Structured LDPC codes with reversed MTR/ECC for magnetic recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 2561-2563, Oct. 2006.

[10] K. Cai, K. A. S. Immink, Y. X. Lee, Z. Qin, and T. C. Chong, "Distance enhancing constrained codes with parity-check constraints for data storage channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, no. 2, pp. 208-217, Feb. 2010.

[11] X. Hu and B. V. K. V. Kumar, "Evaluation of low-density parity-check codes on perpendicular magnetic recording model," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 2, pp. 727-732, Feb. 2007.

[12] S. Jeon and B. V. K. V. Kumar, "Performance and complexity of 32 k-bit binary LDPC codes for magnetic recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 2244-2247, June 2010.

[13] N. Xie, T. Zhang, and E. F. Haratsch, "Improving burst error tolerance of LDPC-centric coding systems in read channel," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 3, pp. 933-941, Mar. 2010.

[14] T. Morita, Y. Sato, and T. Sugawara, "ECC-less LDPC coding for magnetic recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 5, pp. 2304-2306, Sep. 2002.

[15] W. Tan, "Design of inner LDPC codes for magnetic recording channels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 217 -222, Jan. 2008.

[16] J. Kim, J. Lee, and J. Lee, "Performance of low-density parity check codes with parity encoded by (1, 7) run-length limited code for perpendicular magnetic recording," *IEEE, Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 4610-4613, Nov. 2012.

[17] J. Kim and J. Lee, "Performance of noise-predictive turbo equalization for PMR channel," *J. KICS*, vol. 33, no. 10, pp. 758-763, Oct. 2008.

김진영 (Jinyoung Kim)



2007년 2월 숭실대학교 기계공학과 학사
 2009년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사
 2012년 8월 숭실대학교 정보통신전자공학부 박사
 <관심분야> 스토리지 시스템, 반복 부호 부호, 채널코딩

이재진 (Jaejin Lee)



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 정보통신연구소 책임연구원
 1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과 부교수
 2005년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수
 <관심분야> 통신이론, 채널코딩, 기록저장 시스템