

수직 자기기록 채널에서 연집에러에 따른 LDPC 부호의 성능

준회원 김 상 인*, 종신회원 이 재 진*

Burst Error Performance of LDPC codes on Perpendicular Magnetic Recording Channel

Sangin Kim* Associate Member, Jaejin Lee* Lifelong Member

요 약

본 논문에서는 수직 자기기록 채널에서 연집에러에 따른 LDPC(low density parity check) 부호의 성능을 분석한다. 수직 자기기록 채널에서 연집에러가 발생하면 수신부에서는 채널상태정보(channel state information)를 통하여 연집에러 부분을 알아낸 후 채널검출기의 연관정(Log Likelihood Ratio) 값을 0으로 초기화하는 방법을 사용한다. 패리티 검사 행렬은 부호율이 0.94인 (4336,4096)와 (8672,8192)를 사용한다. 그리고 채널 검출기는 연산량이 적은 SOVA(soft output Viterbi algorithm)를 사용한다.

Key Words : Perpendicular magnetic recording channel, LDPC codes, Burst error, CSI, SOVA

ABSTRACT

In this paper, we analyze the burst error performance of LDPC codes on perpendicular magnetic recording(PMR) channel. When burst error is generated on PMR channel, we use channel state information(CSI) to set the LLR information of channel detector zero. We consider the rate 0.94 LDPC codes and use SOVA as channel detector with low complexity.

I. 서 론

1990년대 이후, Shannon이 제시했던 이론적인 한계에 근접하는 오류정정부호인 터보 부호, LDPC 부호 등이 제안되어 더 효율적인 통신을 가능하게 하였다^{[1][2]}. LDPC 부호는 터보 부호에 비해 복잡도가 낮을 뿐만 아니라 우수한 거리 특성으로 오류마루 현상이 나타나지 않고, 병렬 처리에 의한 고속 처리가 가능하다는 장점이 있다. LDPC 부호는 큰 블록 크기에서 채널용량에 근접하지만, 열잡음, 매체잡음 등의 원인으로 연집에러

가 발생할 수 있다. 연집에러가 발생하여 많은 수의 에러를 포함한 블록은 결국 RS 부호와 같은 외부 에러정정부호의 정정능력을 초과하여 복호에 실패할 것이다. 이러한 연집에러 문제와 관련된 연구가 활발히 진행되어 왔다. [3]에서는 내부 에러정정부호의 출력값에 연집에러가 존재한다면 재전송을 하여 연집에러의 영향을 피하는 방법을 제시하였다. 그리고 [4]에서는 초기화 보상(erasure compensation) 방법을 통하여 열잡음과 매체잡음의 영향으로 생긴 연집에러를 정정 하는 방법을 제시하였다. 그리고 [5]에서는 LDPC 부호의 최대

* 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실(yyirex@ssu.ac.kr), (zlee@ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-05-212, 접수일자 : 2008년 5월 15일 최종논문접수일자 : 2008년 10월 21일

복호 가능한 연집에러 길이를 정량화하고, 채널상태정보를 통하여 연집에러 구간을 0으로 초기화하는 방법으로 연집에러를 제거하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 연집에러 발생 시 패리티 검사 행렬 구조에 따른 복호 과정과 패리티 검사 행렬의 최대 복호 가능한 연집에러 길이를 제시한다. 실험으로 연집에러 발생 시 추가 초기화 길이, 연집에러 길이, 부호 길이에 따른 성능 등을 알아본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 수직 자기기록 채널 모델과 전체 시스템 모델에 대하여 알아보고, III장에서는 최대 복호 가능한 연집에러 길이에 대하여 소개한다. IV장에서는 본 논문에서 사용한 SOVA+LDPC 시스템에 대하여 언급하고, 실험 결과 및 결론을 V장과 VI장에서 각각 제시한다.

II. 수직 자기기록 채널

2.1 수직 자기기록 채널

수직 자기기록 채널의 고립 재생 파형은 식 (1)과 같다⁶⁾.

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

여기서 A는 재생 파형 g(t)의 진폭, T₅₀은 고립 재생 신호 진폭의 절반이 되는 지점에서 펄스의 폭을 나타낸다. 기록밀도는 K(= T₅₀/T_b)로 정의된다. T_b는 비트 주기를 뜻한다. 수직 자기기록 채널의 임펄스 응답은 식 (2)와 같다.

$$h(t) = g(t) - g(t - T) \quad (2)$$

수직 자기기록 채널을 통과한 출력신호는 식 (3)과 같다. 입력 비트 a_k와 임펄스 응답의 컨볼루션 값에 잡음 n_w(t)이 합해지는 것으로 나타낼 수 있다.

$$r(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h(t - kT_b) + n_w(t) \quad (3)$$

2.2 시스템 모델

전체 시스템 블록도는 그림 1과 같다. 채널 출력값에 연집에러를 강제로 넣어준다. 채널 출력값은 -1에서 +1 사이의 값을 갖는다. 따라서 이 사

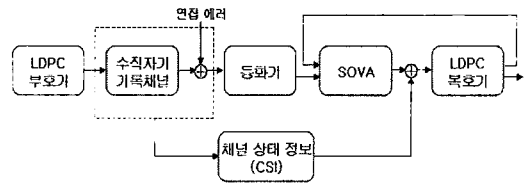


그림 1. SOVA+LDPC 시스템 블록도

이의 임의의 값을 연집에러 구간에 넣어주었다. 그리고 수신부에서는 채널상태정보를 통하여 연집에러 구간을 감지하여 채널 검출기의 연판정값을 0으로 초기화해준다. 부호 내에 0으로 초기화된 연판정 값은 LDPC 반복 복호와 채널 반복 복호를 통하여 원래의 값으로 수렴하게 된다. 본 논문에서는 연집에러의 발생을 채널상태정보를 통하여 수신부에서 정확하게 감지할 수 있다는 가정으로 모델링한다⁵⁾.

그림 1의 수직 자기기록 채널, 등화기 그리고 SOVA는 PRML(Partial Response Maximum Likelihood) 시스템으로 볼 수 있다. PRML 시스템은 정보저장 시스템의 신호처리 방법으로 널리 연구되어 왔다⁶⁾. 여기서 등화기의 역할은 채널을 통과하여 나온 출력값이 PR 타겟값으로 계산된 정답값에 가까워지도록 해주는 역할을 한다.

III. LDPC 부호의 연집에러 복호 능력

LDPC 부호는 패리티 검사 행렬에 따라 성능의 차이가 있다. 또한 연집에러와 관련하여 LDPC 부호의 종류마다 연집에러 정정능력이 달라진다⁵⁾. 여기서 언급된 연집에러 정정능력이란 최대 복호 가능한 연집에러 길이를 뜻한다. 이 값은 부호의 위치마다 그 값이 다르다. [5]에 최대 복호 가능한 연집에러 길이에 관한 알고리즘이 자세히 나와 있다.

그림 2는 연집에러가 발생하였을 때 메시지 전달 알고리즘의 복호 과정을 보여주는 그림이다. 연집에러 구간 이외의 신뢰할 수 있는 정보들을

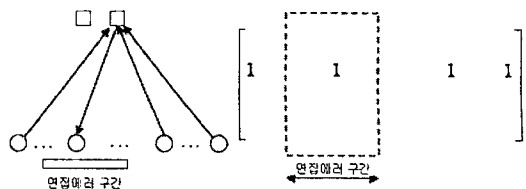


그림 2. 연집에러와 메시지 전달 알고리즘

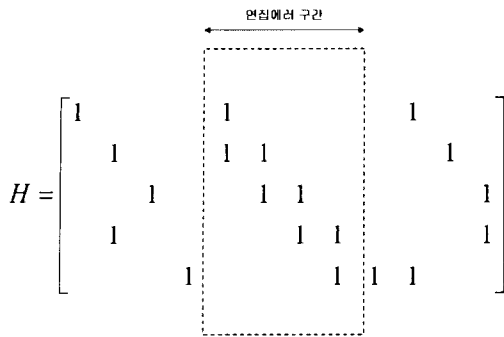


그림 3. 최대 복호 가능한 연집에러 길이

이용하여 연집에러 구간의 정보를 복호할 수 있다. 만약 연집에러 구간 외의 많은 정보가 잡음이 섞여 신뢰할 수 없는 정보가 된다면 연집에러를 제거할 수 없으며 복호과정에서 에러가 다른 위치로 전달될 수 있다. 그림 3은 최대 복호 가능한 연집에러 길이와 관련된 패리티 검사 행렬의 그림이다. 연집에러 구간에서 각 행의 '1' 개수가 한 개이면 복호가 가능하다. 처음 상태에서는 첫 번째 행의 경우만이 복호가 가능하다. 첫 번째 LDPC 반복 복호 후에는 다섯 번째 열의 값이 정정되었기 때문에 두 번째 행도 연집에러 구간에 복호해야하는 '1'이 한 개 남게 된다. 이와 같은 방식으로 총 4번의 LDPC 반복 복호가 진행되면 모든 열의 값이 정정되어 그림 3의 연집에러 구간의 복호가 해결된다.

IV. SOVA+LDPC

4.1 SOVA+LDPC

LDPC 부호는 연판정 값을 통하여 반복 복호를 하기 때문에 MAP(maximum a posteriori), Log MAP, 그리고 SOVA(soft output Viterbi algorithm) 등의 채널 검출기를 사용하여야한다. SOVA는 MAP 알고리즘에 비하여 성능은 다소 떨어지지만 복잡도가 낮은 장점이 있다⁷⁾. SOVA는 Viterbi 알고리즘과 출력값의 형태가 다를 뿐 기능은 같다고 생각할 수 있다.

패리티 검사 행렬은 이중 대각 행렬 구조 방법을 사용하여 생성하였으며 열무게는 3으로 하였다. LDPC 부호화 방법은 Richardson이 제안한 방법을 사용하였다⁸⁾. 그리고 LDPC 복호기는 log domain SPA(sum product algorithm)를 사용하였다.

4.2 채널 반복 복호 과정

SOVA+LDPC 시스템은 채널 검출기(SOVA)와 LDPC 복호기가 서로 정보를 주고받을 수 있는 구조이다. 그림 4는 채널 반복 복호(joint detection and decoding) 과정을 보여주는 그림이다. SOVA의 입력 값은 채널 출력값이 등화기를 통과한 값과 사전 정보(a priori probability)가 있다. 첫 번째 채널 반복 복호의 경우에는 사전정보가 0으로 초기화되어 있다. 위의 두 정보를 통하여 SOVA는 연판정(Log Likelihood Ratio)을 하여 LDPC 복호기에 전달하게 된다. 위의 과정은 SOVA의 자체적인 채널 검출 과정이라 할 수 있겠다. 그리고 LDPC 복호기는 자체적으로 정해진 수만큼의 반복 복호를 하는데, 본 논문에서는 25회로 제한하였다. 만일에 반복 복호 중 패리티 검사를 만족하게 되면 복호를 중단하게 된다. 여기까지가 채널 반복 복호 1회 과정이다. 그리고 LDPC 복호 과정에서 생긴 외부정보(extrinsic information)는 다음 채널 반복 복호를 위해서 SOVA의 사전 정보로 입력이 되고, 이 정보를 이용하여 SOVA는 그 전의 채널 검출 과정에 비하여 더 신뢰할 수 있는 연판정 값을 출력한다. 이 연판정 값을 통하여 LDPC 복호기도 더 신뢰할 수 있는 복호를 할 수 있다.

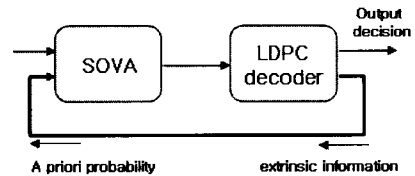


그림 4. 채널 반복 복호 과정

V. 실험 결과

패리티 검사 행렬은 부호율이 0.94인 (4336,4096)와 (8192,8672)를 사용하였다. 본 논문에서는 두 패리티 검사 행렬을 각각 0.5K, 1K 패리티 검사 행렬로 표기했다. 표 1에는 이 행렬들에 따른 최대 복호 가능 연집에러 길이의 평균값과 최소값이 나와 있다. 부호(codeword)의 위치에 따라 최대 복호 가능한 연집에러 길이가 달라지기 때문에 통계치를 구해 놓은 것이다. LDPC 내부 반복 복호는 25회, 채널 반복 복호는 2회 하였다. 수직 자기기록 채널에 기록되는 사용자 비트 밀도(user bit density)는 1.7로 일정하게 하였으며, PR 타켓은 PR(12321)을 사용하였다.

표 1. 패리티 검사 행렬에 따른 최대 복호 가능한 연집에러 길이

패리티 검사 행렬		최대 복호 가능한 연집에러 길이	
		평균값	최소값
0.5K	(4336,4096)	169	47
1K	(8672,8192)	355	142

5.1 추가 초기화 길이에 따른 성능

수직 자기기록 채널에 연집에러가 발생한 경우 채널 출력값은 등화기를 통과하면서 원래 연집에러 구간의 앞뒤로 연집에러가 번지게 된다. 이것은 등화기의 탭 길이와 연관이 있다. 본 논문에서는 탭의 개수가 10개인 MSE(mean square error) 등화기를 사용하였다. 따라서 번지는 연집에러를 고려하여 추가적으로 연판정 값을 초기화해주는 구간을 연집에러 앞뒤에 설정하여 주었고, 본 논문에서는 이를 추가 초기화 길이(guard)로 표기하였다. 그림 5는 추가 초기화 길이에 따른 SER(sector error rate)를 나타낸 것이다. 부호의 일정 위치에 연집에러를 발생시켰으며, 잡음 환경은 AWGN(100%)로 설정하였다. 그림 5에서 추가 초기화 길이가 0일 때 오류마루 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 연집에러가 길어질수록 추가 초기화 길이에 따른 성능 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 그림 5와 논문에 나와 있지 않은 여러 실험을 분석하였을 때 추가 초기화 길이가 10일 때 가장 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다.

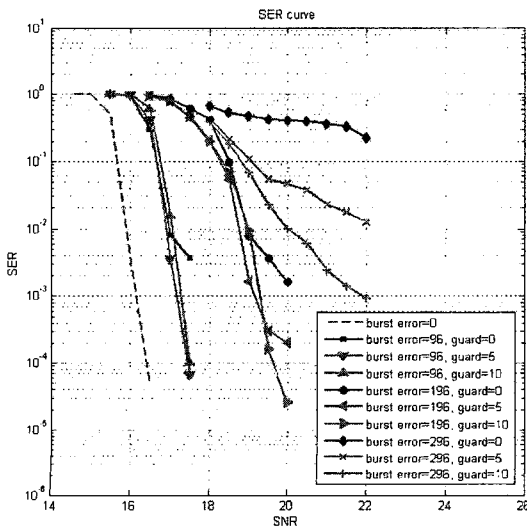


그림 5. 추가 초기화 길이에 따른 성능(1K)

따라서 다른 모든 실험에서는 추가 초기화 길이를 10으로 고정하여 실험하였다. 실제로 연집에러 앞뒤로 추가 초기화가 필요하기 때문에 총 20의 추가 초기화가 실험에 사용되었다.

5.2 SOVA의 연판정 값 초기화에 따른 성능

연집에러 발생 시 수신부에서는 채널 상태 정보를 통하여 연집에러 위치를 정확히 판단하고, 그 위치의 SOVA 연판정 값을 0으로 초기화한다. 그림 6은 이 초기화 과정의 유무에 따른 성능을 보여준다. 부호의 일정위치에 연집에러를 발생시켰으며, 잡음 환경은 AWGN(100%)으로 설정하였다. 초기화 과정이 없는 경우 오류마루가 생기지만, 초기화 과정이 있는 경우는 오류마루 현상을 볼 수 없다. 따라서 이 방법을 통하여 오류마루 현상을 제거할 수 있음을 알 수 있다. 다른 실험 결과들은 연집에러 위치의 연판정 값을 초기화하여 실험한 결과이다.

5.3 연집에러 길이에 따른 성능

그림 7은 부호의 일정 위치에 연집에러를 발생시켰을 경우에 연집에러 길이에 따른 BER 성능을 나타낸 것이다. 잡음 환경은 AWGN(100%)으로 설정하였다. 연집에러 발생 위치의 최대 복호 가능한 연집에러 길이는 178이다. 여기서 총 추가 초기화 길이는 20을 고려해야한다. 따라서 158 이상의 연집에러인 경우 즉, 연집에러 길이 159일 때에는 급격하게 성능이 저하되는 것을 그림

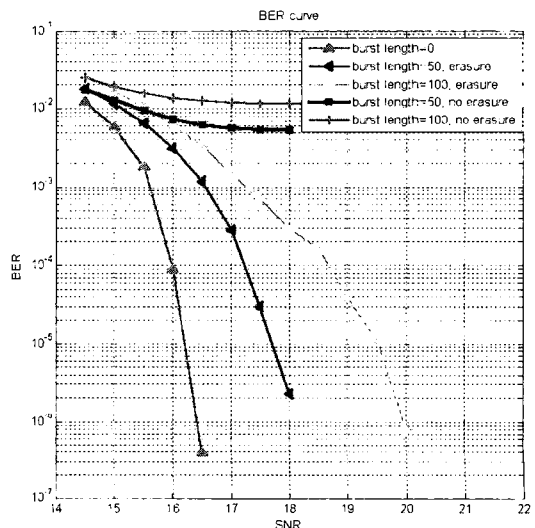


그림 6. SOVA의 연판정 값 초기화에 따른 성능(0.5K)

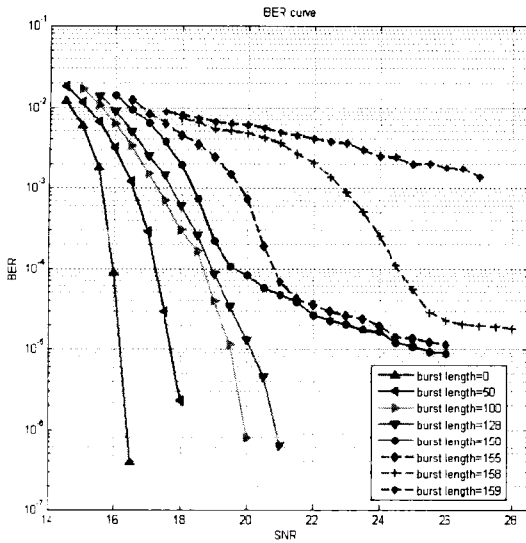


그림 7. 연집에러 길이에 따른 성능(0.5K)

을 통하여 확인할 수 있다. 연집에러가 150 이상 일 때 10^{-5} 부근에서 오류마루가 생기는 것을 볼 수 있는데 이것은 연집에러 부분을 제외한 부분에도 잡음이 섞여 신뢰할 수 없는 정보를 포함하고 있기 때문이다.

5.4 부호 길이에 따른 성능 비교

그림 8은 부호의 임의의 위치에서 일정한 길이의 연집에러가 발생하였을 때 SER 성능을 나타낸 것이다. 잡음은 AWGN(100%)와 AWGN(20%) + 지터잡음(80%)으로 각각 주었다. 지터 잡음 유

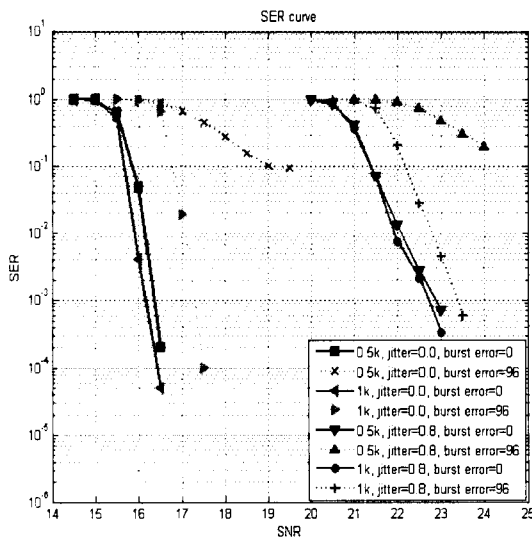


그림 8. 패리티 검사 행렬에 따른 성능(0.5K, 1K)

무에 상관없이 연집에러가 96 비트 발생하였을 때 0.5K는 오류마루가 발생하지만 1K의 경우에는 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 표 1에 나와 있는 것처럼 0.5K 부호 내의 최대 복호 가능한 연집에러 길이 값들 중에 96비트보다 작은 값이 존재하기 때문이다. LDPC 부호의 경우 부호의 길이가 길어질수록 성능이 좋아지는 것은 알려져 있는 사실이며, 그림 8을 통해서 연집에러 발생 시 부호의 길이에 따른 성능 차이가 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

수직 자기기록 채널에 SOVA+LDPC 시스템을 적용하여 전반적인 연집에러에 의한 성능을 알아 보았다. 연집에러 위치를 채널상태정보를 통하여 알아내고 채널검출기의 출력 연판정 값을 0으로 초기화하는 방법을 사용하였다. 이 방법을 통하여 연집에러로 기인한 오류마루 현상을 제거할 수 있었다. 연집에러 발생 시 부호의 길이에 따른 성능 차이가 더욱 커지는 것을 알 수 있었다. 연집에러 길이에 따른 성능 변화를 부호의 최대 복호 가능한 연집에러 길이와 관련하여 분석하였고, 추가 초기화 길이를 설정하여 성능을 비교한 결과 오류마루 제거에 필수적인 역할을 하는 것을 알아내었다.

참 고 문 헌

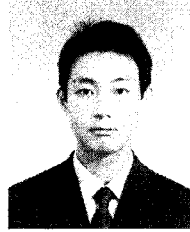
- [1] C. Berrou, A. Glavieux, and Thitimajshma, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-Codes," Proc. IEEE ICC'93, Vol.20, pp.1064-1070, May 1993.
- [2] R. G. Gallager, "Low-Density Parity-Check Code," IRW Trans. IT, vol.8, pp.21-28, Jan. 1962.
- [3] M. N. Kaynak, T. M. Duman, and E. M. Kurtas, "Burst error identification for turbo- and LDPC-coded magnetic recording systems," IEEE Trans. Magnetics, Vol.40, pp.3087-3089, July 2004.
- [4] T. Morita, Y. Sato, and T. Sugawara, "ECC-less LDPC coding for magnetic recording channels," IEEE Trans. Magnetics, Vol.38, pp.2304-2306, Sept 2002.
- [5] M. Yang, W. E. Ryan, "Performance of

efficiently encodable low density parity check codes in noise bursts on the EPR4 channel.” IEEE Trans. Magnetics, Vol.40, pp.507-512, March 2004.

- [6] H. Osawa, Y. Kurihara, Y. Okamoto, H. Saito, H. Muraoka, and Y. Nakamura, “PRML systems for perpendicular magnetic recording,” J. Magn. Soc. Japan, Vol.21, pp.399-405, Oct.1997.
- [7] J. Hagenauer, P. Hoeher, “A Viterbi algorithm with soft decision outputs and its applications.” Proc. IEEE Globecom’89, pp.1680-1686, Nov. 1989.
- [8] T. J. Richardson, R. L. Urbanke, “Efficient encoding of low-density parity-check codes,” IEEE Trans. IT, Vol.47, pp.638-656, Feb. 2001.

김 상 인 (Sangin Kim)

준회원



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

이 재 진 (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 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수
 <관심분야> 통신이론, 채널코딩, 기록저장 시스템