

차수-1 신드롬 전송 방식을 적용한 이진 LDPCA 부호의 성능분석

*신상윤 *장민 *,† 김상호

*성균관대학교

† Corresponding author : iamshkim@skku.edu

Performance evaluation of binary LDPCA code with degree-1 syndrome

*Sang-Yun Shin *Min Jang *,† Sang-Hyo Kim

*Sungkyunkwan University

요약

LDPCA 부호는 부호율-적응적인 특성과 함께 뛰어난 압축률을 가지고 있어 분산 소스 부호화 시스템에서 사용되는 오류정정부호로서 많이 사용되고 있다. 하지만 소스와 보조정보 사이의 상관관계가 낮은 영역에서는 급격한 성능열화가 일어나게 된다. 본 논문에서는 기존 LDPCA 부호에 특정 압축률 이상의 단계에서 추가 누적 신드롬 대신 변수노드와 일대일로 연결되어 있는 차수-1 신드롬을 전송하는 방식을 적용하여 이 영역에서 급격하게 발생하는 성능열화를 줄였다. 또한 차수-1 신드롬과 연결할 변수노드 집합을 선택할 때 복호화기에서 사용하는 LDPCA 부호의 검사노드 차수 분포를 집중시키는 알고리즘을 제안하여 성능을 더욱 향상시켰다.

1. 서론

분산 소스 부호화 기술(distributed source coding, DSC)은 상관관계가 있는 소스들을 독립적으로 부호화하고 결합하여 복호화 하는 문제를 다루고 있다. 1973년 Slepian과 Wolf는 소스들 간의 중복된 정보를 제거하지 않고 서로 독립적으로 부호화 하여도, 두 소스를 결합하여 부호화할 때 달성 가능한 최대 압축률(Compression rate)을 동일하게 얻을 수 있음을 밝혔다.[1] 그림 1은 Slepian-Wolf 정리에 따라 달성 가능한 두 소스 X와 Y의 압축률을 나타내는 그림이다. 점 A에서 Y를 압축하지 않을 때 X를 최대 압축률까지 압축할 수 있고 압축된 X와 압축되지 않은 Y를 이용해서 복호화기에서 X를 복호화할 수 있음을 알 수 있다. 분산 소스 부호화 시스템에서 압축하지 않은 Y를 보조정보 Y라고 X를 오류정정부호를 사용하여 얻은 동일한 양을 신드롬이라 한다. 부호화기는 신드롬을 생성한 후, 그 일부를 복호화기에 전송하고, 복호화기는 신드롬의 일부와 Y를 함께 복호화하여 원래의 X를 복원한다. X와 Y의 상관관계가 낮을수록 복호화 할 때 필요한 신드롬의 수는 증가하기 때문에 분산 소스 부호화 시스템에서 사용되는 오류정정부호는 X와 Y의 상관관계에 따라 다른 신드롬 수를 필요로 하는 부호율-적응적인(rate-adaptive) 특성을 지녀야 한다.

채널용량에 근접하는 LDPC 부호[5] 기반의 LDPCA 부호[2]는 뛰어난 압축률과 함께 이러한 부호율-적응적인 특성을 잘 반영하여 터보 부호와 함께 분산 소스 부호화 시스템에서 많이 사용되는 오류정정부호이다. 하지만 LDPCA 부호는 X와 Y의 상관관계가 낮은 영역에서 압축률이 급격히 떨어지는 문제가 있다. Kasai는 비이진 LDPCA 부호와 특정 압축률 이후부터는 추가 누적 신드롬 대신 차수-1 신드롬을 전송하는 방식을 사용하여 기존의 상관관계가 낮은 영역에서 LDPCA 부호의 성능이 급격히 저하되는 문제점을 해결하였다.[3] 하지만 비이진 LDPCA 부호는 복호화 할 때 발생하는 높은 연산량에 의해 분산

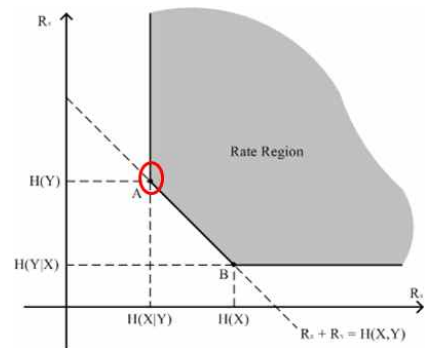


그림 1. 두 소스 X, Y의 압축률의 달성 가능한 영역

소스 부호화 시스템의 응용인 분산 소스 비디오(distributed video coding, DVC) 시스템 같은 실시간 처리속도가 중요한 환경에서는 적합하지 않다. 이진 LDPCA 부호는 비이진 LDPCA 부호와 달리 차수-1 신드롬에 연결할 변수노드를 랜덤하게 선택하면 상관관계가 낮은 영역에서의 성능이 크게 개선되지 않으며 오히려 기존 LDPCA 부호와의 접합부분에서 성능이 저하되는 현상이 일어난다. 따라서 차수-1 신드롬을 생성할 때 신드롬에 연결할 변수노드 집합을 선택하는 과정이 추가로 고려되어야 한다.

본 논문에서는 차수-1 신드롬 전송 방식을 이진(binary) LDPCA 부호에 적용하여 기존 LDPCA 부호에서 발생하는 상관관계가 낮은 영역에서의 급격한 성능저하를 개선하고 차수-1 신드롬을 생성할 때 신드롬에 연결할 변수노드 집합을 선택하는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 LDPCA 부호와 차수-1 신드롬 전송 방식에 대해서 알아보고 3장에서는 차수-1 신드롬과 연결할 변수노드 집합을 선택하는 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 기존 LDPCA 부호와 차수-1 신드롬을 적용한 방식에 대한 모의실험 결과에 대해 알아보고 5장에서 결론을 내리도록 한다.

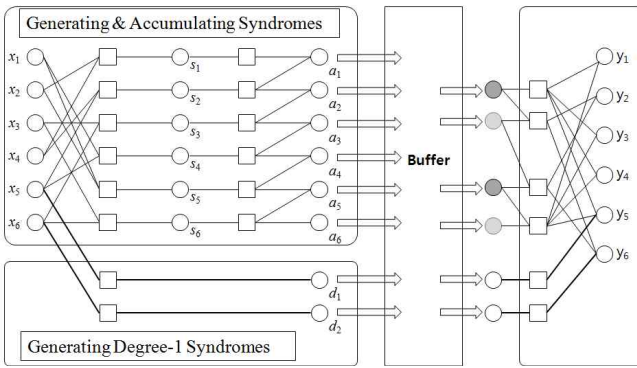


그림 2. 차수-1 신드롬 전송방식을 적용한 LDPCA 부호

2. 시스템 모델

가. LDPCA 부호

분산 소스 부호화 시스템에서는 상관관계가 있는 소스 X와 보조 정보 Y와의 관계를 가상 채널로 모델링한다. 일반적으로 가상 채널로서 이진 대칭 채널(binary symmetric channel, BSC)이나 이진 AWGN 채널을 사용하는데 본 논문에서는 소스 X와 보조정보 Y와의 관계를 BSC로 모델링 하였다. 보조정보 Y는 가상채널을 통과하여 소스X에 에러가 더해진 것으로 고려되는데 복호기는 부호기에서 전송받은 신드롬을 사용하여 이러한 에러를 없애고 소스X로 복원해낸다. 보조정보 Y와 소스 X의 상관관계가 낮을수록 보조정보 Y에 더해진 에러의 양은 증가하게 되고 이렇게 증가한 에러를 고쳐 소스 X로 복원하기 위해서는 더 많은 양의 신드롬을 가져서 성능이 우수한 오류정정부호가 필요하다. 하지만 신드롬의 양은 소스 X의 압축된 양과 같기 때문에 복호에 필요한 신드롬의 수가 증가할수록 소스 X의 압축률은 줄어들게 된다. 따라서 오류정정부호는 소스 X와 보조정보 Y간의 상관관계에 따라 복호화 할 때 필요한 신드롬의 수를 최소한으로 하는 부호율-적응적인 특성이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 특성을 가진 오류정정부호로 비균일(deg 3 to 21) 6336 LDPCA 부호[2]를 사용한다. 이 LDPCA 부호는 6336개의 소스비트를 부호화하여 동일한 양인 6336개의 신드롬을 생성하고 이렇게 생성한 신드롬을 순차적으로 누적하여 같은 양의 누적신드롬을 생성한다. 그리고 96개씩 총 66단계에 걸쳐 순차적으로 누적신드롬을 복호기에 전송하여 복호하는데 복호가 실패하게 되면 피드백에 의해서 각 단계에 맞는 추가적인 누적신드롬이 복호기로 전송된다. 복호기는 추가적인 누적신드롬을 수신 받을 때 마다 검사노드 방정식을 수정하는 방식으로 부호율-적응적인 복호를 지원한다.

나. 차수-1 신드롬 전송

LDPCA 부호는 수신심벌의 log-likelihood ratio(LLR)을 이용하는 신뢰전파(belief propagation, BP) 복호방법을 사용한다. BP 복호방법에서 검사노드 처리과정은 입력 메시지 값 중 낮은 신뢰도 값에 의존하기 때문에 100%의 신뢰도를 갖는 LLR 메시지는 검사노드 처리과정에서 나오는 메시지에 아무런 영향을 미치지 않는다. 따라서 채널을 통해 100% 신뢰도를 갖는 LLR 메시지를 받은 변수노드는 지워지는 것과 같은 현상이 발생하고 이에 따라 변수노드와 검사노드의 차수분포가 변하게 되어 부호의 성능이 변하게 된다.

	65단계의 LDPCA 부호	차수-1 신드롬 전송		
		랜덤하게 변수노드집합 선택	실험적으로 얻은 변수노드집합 선택	제한한 알고리즘 사용
p_{10}	0.031572	0.011068	0.004472	
p_9		0.07016	0.021633	
p_8		0.148597	0.08318	
p_7		0.188971	0.154956	0.001473
p_6		0.146672	0.172732	0.043353
p_5	0.800967	0.134257	0.167701	0.318134
p_4	0.167461	0.149752	0.175974	0.244405
p_3		0.10986	0.139024	0.192985
p_2		0.035898	0.068087	0.199649
p_1		0.004764	0.012242	

표 1. 65단계에서 검사노드의 차수 분포표

차수-1 신드롬은 변수노드와 일대일로 연결하여 생성된 신드롬이다. 분산 소스 부호화 시스템에서 신드롬을 전송할 때 오류가 생기지 않기 때문에 복호화기는 차수-1 신드롬에 연결된 변수노드를 100% 신뢰도로 전송받게 된다. 이에 따라 LDPCA 부호의 변수노드와 검사노드 차수분포가 변하게 되어 부호의 성능이 변하게 된다.

다. 차수-1 신드롬 전송을 결합한 LDPCA 부호

본 논문의 시스템 모델은 그림 2와 같다. 총 66단계의 2/3인 44단계까지는 각 단계마다 96개의 누적신드롬을 보내고 추가적인 누적신드롬을 수신 받을 때 마다 검사노드 방정식을 수정하는 방식을 사용한다. 그리고 나머지 단계의 1/3인 22단계는 각 단계마다 변수노드와 일대일로 연결되어 있는 96개의 차수-1 신드롬을 전송한다. 각 단계 모두 복호가 실패하게 되어 최종 66단계에 도달하면 96×22개의 변수노드가 지워져서 96×44개의 변수노드가 남게 되고 이는 44단계까지 누적 신드롬을 받아 수정된 검사노드의 수와 같게 되어 부호율이 1이 되게 된다. LDPCA부호에서 변수노드는 변수, 검사노드는 방정식을 의미하기 때문에 66단계에 이르러 변수노드와 검사노드의 수가 같게 되면 변수와 방정식의 수가 같게 되어 무조건 복호성공 하게 된다.

3. 차수-1 신드롬 생성 알고리즘

가. 차수-1 신드롬과 일대일로 연결된 변수노드 집합

차수-1 신드롬은 변수노드와 일대일로 연결하여 생성 한다. 본 논문에서 총 신드롬 중에 차수-1 신드롬이 차지하는 비율이 1/3이므로 6336개의 전체 변수노드 중에 1/3인 2112개의 변수노드만 차수-1 신드롬과 연결되게 된다.

표 1은 차수-1 신드롬에 연결할 변수노드를 랜덤하게 고른 경우, 실험적으로 찾은 경우, 그리고 3장에서 제안할 알고리즘으로 찾은 경우에서의 복호화기에서 사용되는 검사노드의 차수분포와 기존 65단계 LDPCA 부호의 검사노드에 대한 차수분포를 65단계에서 비교한 표이다. 최종 66단계에서는 압축률이 1이 되어 성능을 판단할 수 없기 때문에 65단계에서 검사노드 차수분포를 분석하였다.

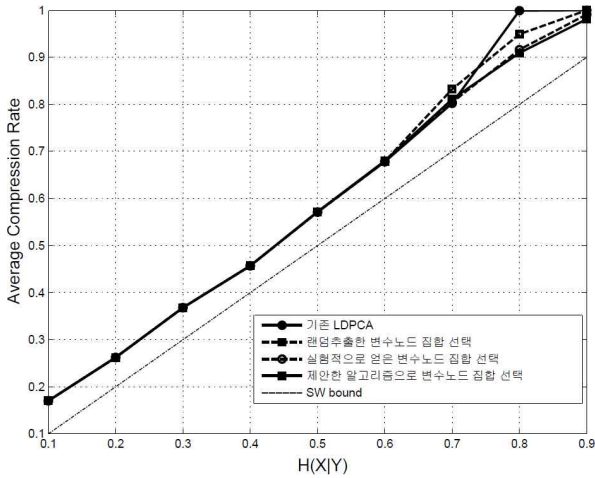


그림 3. 전 영역에서의 차수-1 신드롬 전송 방식과 기존 LDPCA 부호의 압축부호율

차수-1 신드롬 전송방식을 기존 LDPCA 부호와 비교하였을 때 차수가 10인 검사노드에 대한 차수분포가 감소하였음을 확인 할 수 있다. 그리고 차수-1 신드롬에 연결할 변수노드 집합을 랜덤하게 고른 경우와 실험적으로 찾은 성능이 좋은 변수노드 집합을 사용하였을 경우를 비교해 보면 랜덤하게 고른 경우에 비해 실험적으로 찾은 경우에서 높은 차수를 갖는 검사노드에 대한 차수분포가 감소하였음을 확인 할 수 있다. 따라서 차수가 높은 검사노드가 성능에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

나. 변수노드 집합을 선택하는 알고리즘

다음의 4가지 조건을 사용하여 변수노드 집합을 선택한다. 조건 1은 검사노드의 차수 분포를 전체적으로 낮추기 위한 조건이고, 조건 2는 검사노드의 차수 분포를 감소시킬 때 가장 큰 차수를 가진 검사노드부터 감소시키는 조건이다. 그리고 조건 3은 검사노드를 집중시켜 차수가 높은 검사노드를 효율적으로 감소시키기 위해 사용하는 조건이다.

조건 1. 차수-1 신드롬과 연결할 변수노드 집합을 고를 때 차수가 큰 변수노드부터 선택하여 검사노드의 차수가 최대한 빨리 낮아지도록 한다.

조건 2. 변수노드 집합에 연결되어 있는 검사노드의 차수는 큰 것이 하나라도 있어야 한다. (차수가 작은 것들만 연결되어 있는 변수노드는 선택하지 않는다.)

조건 3. 차수가 0, 1인 검사노드를 만들지 않기 위해서 변수노드에 연결되어 있는 검사노드의 차수가 2인 것이 하나라도 있으면 선택하지 않는다.

조건 4. 한번 변수노드를 고르면 그 변수노드는 이미 지워진 것과 같기 때문에 고른 변수노드를 다시 고르지 않는다.

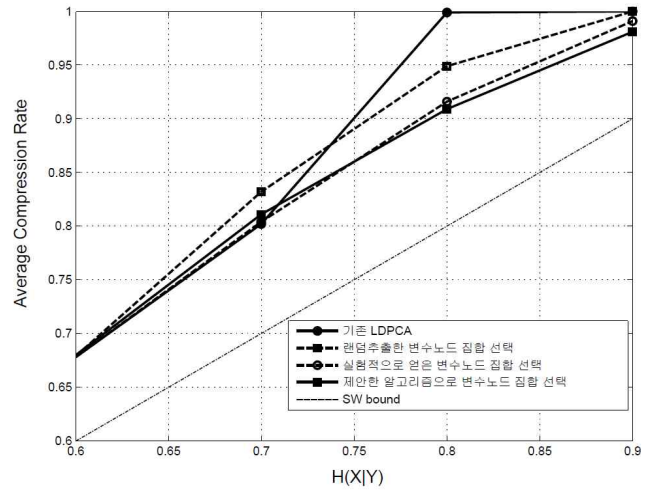


그림 4. 상관관계가 낮은 영역에서의 차수-1 신드롬 전송 방식과 기존 LDPCA 부호의 압축부호율

4. 모의실험 결과

그림 2는 전 영역에서 기존 LDPCA 부호와 차수-1 신드롬 전송방식을 적용한 LDPCA의 성능을 비교한 그림이다. 차수-1 신드롬 전송방식을 적용하여도 44단계까지는 기존의 LDPCA 부호와 동일한 신드롬을 보내기 때문에 44단계 전에 복호가 성공하는 $H(X|Y)$ 가 0.6이하인 부분에서는 동일한 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

그림 3을 보면 소스 X와 보조정보 Y의 상관관계가 낮은 부분에서 차수-1 신드롬을 사용하면 기존 LDPCA 부호보다 성능이 향상된 것을 볼 수 있는데 특히 제안된 알고리즘을 사용하여 차수-1 신드롬을 생성하였을 경우 $H(X|Y)$ 가 0.8, 0.9인 부분에서 각각 9%, 2% 향상된 것을 볼 수 있다. 반면에 $H(X|Y)$ 가 0.7인 부분에는 1%의 성능열화가 발생하는데 이는 처음에 차수가 높은 변수노드와 연결된 차수-1 신드롬을 보내었기 때문에 변수노드의 차수분포가 성능열화가 되는 쪽으로 변화하였기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 차수-1 신드롬 전송 방식을 적용하면 소스 X와 보조정보 Y의 상관관계가 낮은 영역에 발생하는 기존 LDPCA 부호의 급격한 성능열화가 줄어드는 것을 확인하였고, 이 영역의 성능을 더욱 향상시키는 알고리즘을 제안하였다. 하지만 $H(X|Y)$ 가 0.7인 부분에서 다소 성능열화가 발생하였다. 이는 제안한 알고리즘을 써서 변수노드를 선택하면 변수노드의 차수분포는 고려하지 않고 초기 차수가 큰 변수노드와 연결된 차수-1 신드롬부터 보내기 때문에 기존 LDPCA 부호의 변수노드 차수분포가 성능이 좋지 않은 방향으로 변화하게 하기 때문이다. 차수-1 신드롬 전송 방식이 크게 성능을 발휘하는 영역은 63, 64, 65 단계이기 때문에 일단 제안한 알고리즘으로 변수노드 집합을 선택하여 차수-1 신드롬을 생성하면 차수-1 신드롬을 어떠한 순서로 보내도 상관관계가 낮은 영역에서는 차수-1 신드롬들이 모여 검사노드의 차수분포를 집중시켜 같은 성능을 내게 된다. 따라서 차수-1 신드롬을 전송할 때 변수노드 차수분포를 고려하여 보내면 $H(X|Y)$ 가

0.7인 부분의 성능열화를 극복할 뿐만 아니라 더욱 좋은 성능을 낼 수 있을 것이라 본다. 향후 변수노드의 차수분포를 고려하여 상관관계가 낮은 영역에서의 성능을 더욱 높이고, 더 나아가 각 단계별로 최적화된 차수분포를 갖도록 하여 차수분포가 고정될 수밖에 없었던 기존 LDPCA 부호의 한계를 극복하는 방법에 대해 연구할 예정이다.

논문사사

본 논문은 한국산업기술평가관리원 IT산업원천기술개발 사업 지원으로 수행되었습니다. (차세대 모바일 영상서비스를 위한 초경량 비디오 부호화 원천기술 개발과제번호: 2009-F-032-01)

참고문헌

- [1] J. D. Slepian and J. K. Wolf, "Noiseless coding of correlated information sources," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 19, pp. 471-480, July 1973.
- [2] D. Varodayan, A. Aaron, and B. Girod, "Rate-adaptive codes for distributed source coding," *EURASIP Signal Processing Journal, Special Section on DSC*, vol.86, no.11, Nov. 2006.
- [3] K. Kasai, T. Tsujimoto, R. Matsumoto, and K. Sakaniwa, "Rate-compatible slepian-wolf coding with short non-binary LDPC codes," in *Proc. 2010 IEEE Data Compression Conference(DCC)*, Mar. 2010, pp. 288 - 296.
- [4] T. Richardson and R. Urbanke, "The capacity of low-density parity check codes under message-passing decoding" *IEEETrans.Inform.Theory*, vol. 47, pp. 599 - 619, Feb. 2001.
- [5] S.-Y. Chung, G. D. Forney, Jr. T. J. Richardson, and R. L. 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.