

선택적 계층 기반의 LDPC 코드를 위한 BP 복호 기법

윤찬호, 조원철, 고영조
한국전자통신연구원

chyoon@etri.re.kr

Selective layered BP decoding for NR LDPC codes

Chanho Yoon, Woncheol Cho, and Young-Jo Ko
Electronics Telecommunications Research Institute (ETRI)

요 약

본 논문은 본 논문에서는 NR LDPC 코드를 위한 선택적 계층 Belief Propagation (BP) 복조 방식 (Selective layer BP decoding)을 제안한다. 기존 layer 복조 방식에서 일괄적으로 check 및 variable node를 갱신해주는 것과 달리, 제안하는 방식은 천공된 부분을 위한 서브 매트릭스 영역에서의 디코딩을 위한 서브 반복 디코딩을 선택적으로 수행한다. 모의 실험 결과 high SNR에서 성능이 개선됨을 보여주고, 또한 복호 지연시간을 단축시키는 효과를 준다.

I. 서 론

최근에 Low Density Parity Check (LDPC) codes가 3GPP new radio (NR)의 non-standalone 및 standalone 버전에 채택이 되었다. 이 rate-compatible한 NR LDPC 코드는 QC-LDPC 형태로 design되어 있으며, 복호하는데 효율적인 방법 중 하나가 layered 형태로 기존 flooding 방식과 달리 check이던 variable node 먼저 LLR update를 적용시킨 후 다음 layer에서의 check 및 variable node LLR update 반복 복호를 수행한다. 최근에 다양한 layered 형태로 복호를 수행하는 방법이 제시되어 왔다. 하지만, punctured된 LDPC 부호어를 복조하기 위해 제시된 방법은 주로 AWGN 채널에서 적용하여 성능을 평가가 이루어졌다. 하지만 실제 무선 채널에서의 성능을 평가하여 제시한 결과는 찾는 것이 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 NR LDPC를 복호할 때 punctured bit을 효과적으로 복구하는 방법에 관하여 설명한다.

II. 본론

Rate compatibility를 달성하기 위한 방법으로 information bit shortening, raptor-like 형태의 Luby transform을 기반한 encoding을 supporting하는 방법과 puncturing을 동원하는 기법 등이 있다. NR LDPC의 경우 H matrix에 node density가 높은 특정 column을 design하여 그 지정된 column과 관련된 codeword bit을 천공시키는 방식으로 처리되어 변조 후 전송되어진다. 특히 이 천공된 bit은 송신단의 circular buffer에 저장되지 않는다는 특징이 있다. 즉, 수신단에서 천공된 bit과 관련된 채널을 통과한 LLR 값은 HARQ가 발생하더라도 제공되지 않는다는 전제 조건인데, 이는 반대로 해석하면 높은 확률로 수신단에서 정확히 recover할 수 있다는 가정도 추측해 볼 수 있다. 이는 결국 천공된 부분의 H matrix는 높은 density를 가진다는 것이 특징인데, 이는 또한 puncturing된 부분이 잘 복구가 되면 전체적인 codeword 복구가 순조롭게 진해된다는 것을 뜻한다. 하지만, 반대로 만일 천공된 영역의 LLR recovery가 잘못될 경우, 이는 전체 codeword 복구에 상당한 영향을 끼친다는 것을 의미한다.

그림 1은 NR LDPC base graph 2를 나타낸 그림이며, rate matching과 관련된 천공 region을 나타내고 있다. 임의의 색으로 칠해진 부분은 node가 존재하는 구역이며 QC-LDPC의 lift size만큼의 정방 행렬 크기를 가진다. 천공 구역을 보면 2개의 column 모두 node가 존재하는 경우와 하나만 node가 존재하는 경우가 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 2개의 column 모두 공허한 row는 존재하지 않는다.

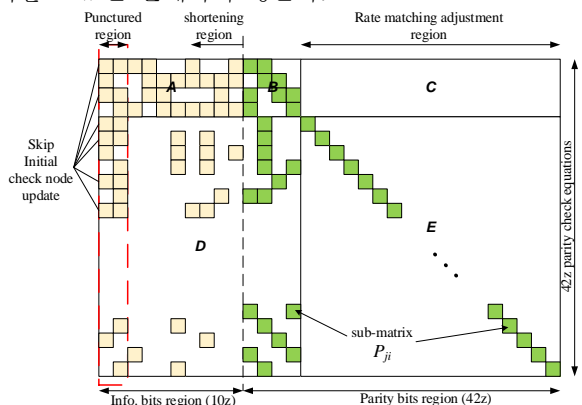


Figure 1 NR LDPC base graph 2 예시

기존 layered BP 복호방식은 이 H matrix를 수신단에서 row 또는 column을 기준으로 나누어 layered BP 복호 기법을 적용하면, 천공된 지역의 2 column 중 한 개라도 node가 존재하게 되면 0 LLR 값을 가지고 천공 외 지역에서 check node update를 적용한다. Check node update는 결국 부호를 결정하는 역할을 하지만, unknown 0 LLR을 의미하는 +LLR을 곱하게 되면, 실제 송신단에서 -LLR을 보낸 경우 잘 못 update가 될 수 있게 된다. 이것이 천공 region에서의 node가 1개 또는 2개가 되더라도 모두 +LLR로 결정하게 되면 결국 check node update에 잘못된 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 본 논문에서 천공 region을 우선 복구하고 rm region 내에 있는 submatrix의 각 row의 density 따라 선택적으로 우선 check node 및 variable update를 적용시키는 선택적 계층 기반의 BP 복호 알고리즘을 제안한다.

천공된 region의 LLR를 복구하기 위한 column wise layered BP decoding 절차는 다음과 같다. 1) 우선

천공 region H matrix 에 해당하는 check 및 variable node 만 update 하며, 2 개의 column 중 2 개의 node 가 모두 존재하는 row 는 check 및 variable node update 를 수행하지 않는다. 그림 1 의 예시를 들자면, 1, 3, 6, 7, 9 ... 번째의 row 만 천공 region 에 속하는 node 의 check node update 를 하고 variable node update 를 수행한다. 2) variable node update 를 취할 때, 2 개의 node 가 모두 존재하는 row 들의 variable node update 도 취해준다. 즉, check node 는 하지 않은 node 들이지만, 1 개의 node 만 존재하는 row 들이 제공한 check node update 값으로 density 가 높기 때문에 충분히 LLR 값을 variable node update 로 얻을 수 있다. 3) 다시한번 천공 region 에 속한 sub H matrix 만 column-wise layered decoding 을 적용한다. 단, 이때는 2 개의 column 모두에 node 가 존재하는 row 이더라도 check node update 를 진행한다. 이때는 이미 지난 순서에서 1 개의 column node 만 존재하는 row 에 대해 LLR 값이 partially 복구가 되었기 때문이다.

제안하는 column-wise layered BP 복호 방법을 적용하여 AWGN only 및 frequency selective fading channel 에서의 성능을 살펴보기로 한다. 우선 아래 그림 2 는 AWGN only 에서의 성능이다.

천공 region 을 무시하고 기존의 universal layered BP decoding (ULBP) 을 적용하는 경우, low SNR region 에서는 SNR 이 증가할 수록 일정한 비례관계를 가지며 복호성능이 향상되는 것을 볼 수 있으나, high SNR region 에서는 천공 region 에서의 LLR 값 update 오류의 가능성에 의해 성능의 개선이 이루어지지 않는다.

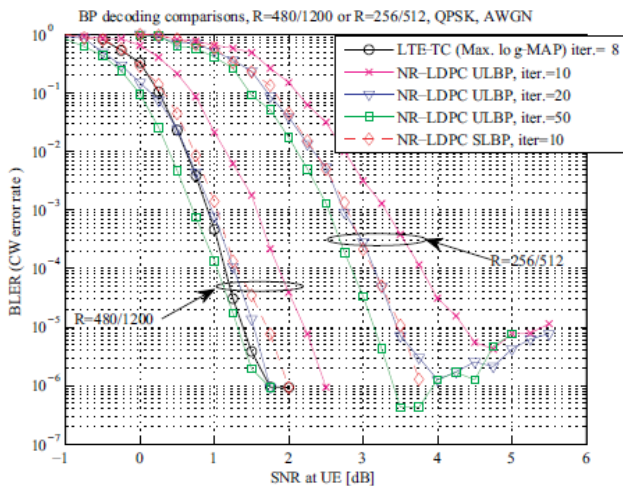


Figure 2 일반적인 layered decoding 과 제안하는 방식의 AWGN only 채널에서의 성능 비교

제안하는 selective layered BP (SLBP)를 적용하는 경우 low 및 high SNR region 에서 SNR 증가에 따른 일정한 성능을 보여준다. 다음은 3GPP TDL-A frequency selective fading 채널에서의 성능을 보여준다.

TDL-A 채널에서도 ULBP 는 천공된 LLR 의 update 불확실성에 의한 error 가 더 확연히 나타난 것을 볼 수 있으며, 제안한 방식은 그러한 문제를 해결하여 fading 채널에서의 예측 가능한 성능 BLER curve 를 보여주고 있다.

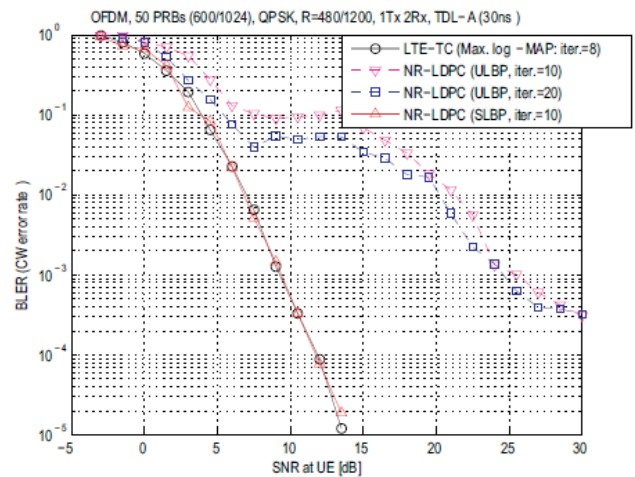


Figure 3 TDL-A 채널에서의 ULBP vs SLBP 의 성능 비교

III. 결론

본 논문에서는 NR LDPC 코드를 복호 하는데 있어 간단하지만 효과적으로 천공된 LLR 을 복구하는 column-wise 선택적 계층 기반의 LDPC 복호 방법을 제안하였다. 천공된 region 에서 update 된 LLR 값의 오류를 최소화하고자 복호 scheduling 을 특별히 구성한 특징을 가지고 있다. 모의 실험 결과 AWGN only 채널에서 high SNR 에서도 low error floor 를 유지 하고 fading 채널에서도 예측 가능하며 안정적인 복호 성능을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2019-0-00002,[전문연구실]조정밀 서비스 실현을 위한 On-Time·On-Rate 무선액세스 및 광에지 클라우드 네트워킹 핵심기술 개발).

참고 문헌

- [1] R. G. Gallager, "Low-density parity check codes," *IRE Trans. Inform. Theory.*, vol. IT-8, pp. 21-22, Jan. 1962.
- [2] D. J. C. MacKay, "Good error-correcting codes based on very sparse matrices," *IEEE Trans. Inform. Theory.*, vol. IT-45, pp. 399-431, Mar. 1999.
- [3] 3GPP specification TS 38.212 v15.1.1, "3GPP; TSG RAN; NR; Multiplexing and channel coding", April. 2018.
- [4] J. Ha, D. Kline, J. Kwon, and S. W. McLaughlin, "Layered BP decoding for rate-compatible punctured LDPC codes," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 11, pp. 440-442, May 2007.
- [5] J. Kwon, D. Kline, J. Ha, and S. W. McLaughlin, "Fast decoding of rate compatible punctured LDPC codes," in *Proc. IEEE ISIT*, Nice, France, Jun., 2007, pp. 216-220.
- [5] F. Hamidi-Sepehr, A. Nimbalkar, and G. Ermolaev, "Analysis of 5G LDPC codes rate-matching design," in *Proc. IEEE VTC spring*, Porto, Portugal, Jun., 2018, pp. 1-5.