

프로토그래프 기반 PBRL LDPC 부호의 오류 마루 개선을 위한 트래핑 집합 완화 기법

한민석¹, 박호성^{1,*}, 이재영², 김판수²

전남대학교¹, 한국전자통신연구원²

gksalstjr777@gmail.com, hpark1@jnu.ac.kr, jaeyl@etri.re.kr, pskim@etri.re.kr

Trapping Set Mitigation for Error Floor Improvement of Protograph-Based PBRL LDPC Codes

Minseok Han¹, Housng Park^{1,*}, Jae-Young Lee², Pansoo Kim²

Chonnam National Univ.¹, ETRI²

요약

본 논문은 고신뢰도와 저지연이 요구되는 NTN 무선 통신 환경에 적합한 프로토그래프 기반 랩터 유사 저밀도 패리티 검사 부호에서 일부 엷지의 시프트 값을 변경하는 기법을 제안하고, 이에 대한 시뮬레이션 결과를 분석한다. 변경한 엷지의 시프트 값은 반복 복호 과정에서 발생하는 전체 패리티 검사 부호의 주요한 성능 하락 원인인 트래핑 집합을 완화하는 방향으로 이루어져 있다. 제안하는 방법은 기존 부호의 프로토그래프 구조를 유지하면서, 트래핑 집합에 직접적으로 관여하는 엷지를 선택적으로 수정함으로써 오류 마루 성능을 개선한다. 시뮬레이션 결과 측면에서는 BLER 성능 곡선의 오류 마루 구간에서 유의미한 성능 향상이 관찰된다. 제안하는 트래핑 집합 완화 알고리즘은 5G NR에 정의된 PBRL LDPC 부호를 비롯하여 일반적인 QC-LDPC 부호에도 적용이 가능하다.

I. 서론

비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN)는 위성 및 고고도 플랫폼을 활용하여 지상 이동통신의 커버리지를 확장하는 핵심 기술로, 재난 통신, 원격 지역 서비스, 사물인터넷(IoT), 그리고 초신뢰·저지연 통신(HRLLC)과 같은 차세대 서비스 시나리오에서 중요성이 지속적으로 증가하고 있다. NTN 환경은 긴 전파 지연, 큰 경로 손실, 제한적인 재전송 기회와 같은 물리적 제약을 가지므로, 물리계층에서의 채널 부호는 매우 낮은 블록 오류율(BLER) 영역에서도 안정적인 성능을 제공해야 한다.

5G NR에서는 데이터 채널을 위해 프로토그래프 기반 랩터 유사 저밀도 패리티 검사(PBRL, Protograph-Based Raptor-Like) LDPC 부호가 표준으로 채택되었다. PBRL LDPC 부호는 준순환(quasi-cyclic, QC) 구조를 기반으로 하여 다양한 부호율과 블록 길이를 효율적으로 지원하며, 하드웨어 구현 측면에서도 높은 병렬성과 메모리 효율을 제공한다. 그러나 유한 블록 길이 및 제한된 반복 복호 환경에서는, 이론적으로 우수한 임계값 성능에도 불구하고 오류 마루(error floor) 현상이 관찰되며, 이는 고신뢰 통신을 요구하는 NTN 시나리오에서 성능을 제한하는 주요 요인으로 작용한다.[1]

LDPC 부호의 오류 마루 현상은 반복 복호 과정에서 특정 변수 노드 집합이 잘못된 상태에 고착되거나 진동하는 트래핑 집합(trapping set)의 존재와 밀접한 관련이 있다.[2] 트래핑 집합은 비교적 작은 크기의 부분 그래프임에도 불구하고 반복 복호를 실패로 이끌 수 있으며, 특히 QC-LDPC 부호에서는 프로토그래프 리프팅 과정에서 결정되는 엷지의 시프트 값(shift value)에 의해 그 구조가 크게 좌우된다.[3] 기존 연구들은 주로 차수 분포 최적화, 프로토그래프 재설계, 또는 복호 알고리즘 수정에 초점을 맞추어 왔으나, 이미 정의된 표준 LDPC 부호에 대해 트래핑 집합을 직접적으로 완화 또는 제거하는 구조적 접근은 상대적으로 충분히

다루어지지 않았다.[4],[5]

본 논문에서는 NTN 환경에 적합한 고신뢰·저지연 채널 부호 설계를 목표로, PBRL LDPC 부호에서 일부 엷지의 시프트 값을 선택적으로 변경함으로써 지배적인 트래핑 집합을 제거하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 기존 부호의 프로토그래프 구조를 유지하면서, 오류 마루 성능 저하의 직접적인 원인이 되는 트래핑 집합을 구조적으로 붕괴시키는 데 큰 역할을 한다.

II. 본론

본 연구에서는 반복 복호 환경에서 관찰되는 오류 마루 현상의 근본 원인을 규명하기 위해, 먼저 반복 복호에 실패한 오류 프레임(error frame)을 체계적으로 분석하여 오류 마루 구간에서 지배적으로 나타나는 트래핑 집합을 식별한다. 이를 위해 최대 반복 횟수까지 복호가 수행된 이후에도 오류가 잔존하는 프레임을 대상으로, 반복 복호 과정 전반에 걸쳐 각 변수 노드(variable node)의 로그 우도비(Log-Likelihood Ratio, LLR) 변화를 반복마다 기록하고 LLR 값 변화의 추이를 분석한다.

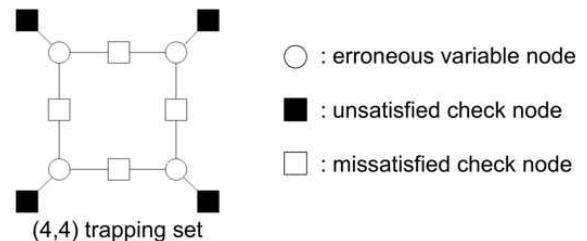


그림 1 트래핑 집합

특히 반복 횟수에 따른 LLR의 부호 및 크기 변화를 기준으로 오류 변수

노드들을 두 가지 유형의 오류 이벤트로 분류한다. 첫 번째는 반복이 진행됨에도 불구하고 LLR이 잘못된 부호로 고착되는 안정 오류 상황이며, 두 번째는 반복 복호 과정 동안 LLR 부호가 반복적으로 반전되며 수렴하지 못하는 진동 오류 상황이다. 이러한 분류는 단일 반복에서의 상태가 아닌, 전체 반복 구간에서의 반복적인 변화를 반영하므로, 단순한 순간적 오류와 구조적 복호 실패를 구분하는 데 효과적이다. 본 연구에서는 이러한 LLR 동적 거동 분석을 통해 트래핑 집합을 구성할 가능성이 높은 오류 변수 노드 집합을 1차적으로 추정한다.

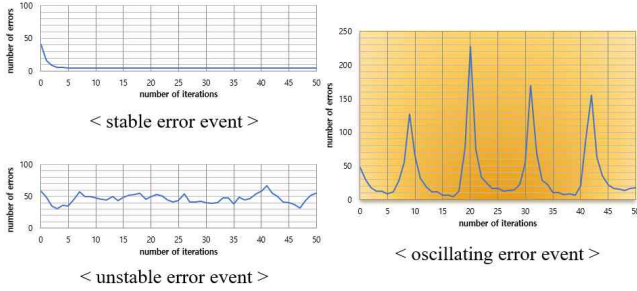


그림 2 트래핑 집합의 안정/진동 상황

이후 식별된 트래핑 집합 후보에 대해서는 태너 그래프 상에서의 구조적 연결 관계를 분석하여, 해당 집합이 이론적으로 정의된 (a, b) 트래핑 집합 조건을 만족하는지 검증한다. 이 과정에서는 오류 변수 노드의 개수(a), 홀수 차수 검사 노드(check node)의 개수(b), 검사 노드 차수 분포, 그리고 해당 부분 그래프 내에 존재하는 짧은 사이클 구조 등을 종합적으로 고려한다. 특히 오류 마루에 지배적인 영향을 미치는 트래핑 집합은 일반적으로 작은 크기의 (a, b) 구조를 가진다. 이러한 구조적 검증을 통해 실제 오류 마루 성능 저하에 기여하는 지배적인 트래핑 집합만을 선별한다.

선별된 트래핑 집합에 대해, 해당 집합을 형성하는 엣지들 중 구조적으로 가장 큰 영향을 미치는 엣지를 식별하고, 이를 중심으로 시프트 값 변경 대상을 결정하지만, 전체 패리티 검사 행렬을 재설계하거나 프로토그래프 자체를 변경하지 않고, 소수의 엣지에 대해서만 시프트 값을 선택적으로 변경함으로써 트래핑 집합 구조를 붕괴시킨다는 점에서 이득이 있다. 이를 통해 기존 부호의 차수 분포, 폭포 구간 성능, 그리고 하드웨어 구현 복잡도는 유지하면서, 오류 마루 성능을 선택적으로 개선할 수 있다.

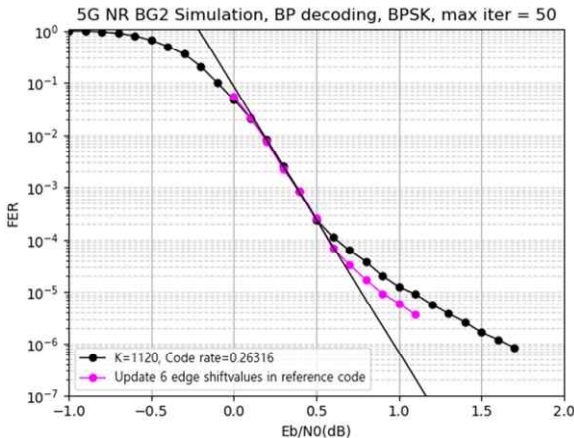


그림 3 시뮬레이션 결과

제안한 기법의 성능 검증을 위해, 시뮬레이션은 5G NR 표준에 정의된 PBRL LDPC 부호를 대상으로 수행되었으며, AWGN 채널 환경에서 반복 복호 기반 블록 오류율(BLER) 성능을 평가하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 시프트 값 변경 기법은 오류 마루 구간에서 BLER 성능을 유의미하게 개선하며, 특히 매우 낮은 BLER 영역에서 성능 곡선의 평탄화 현상

을 효과적으로 완화함을 확인하였다. 또한 동일한 접근법을 일반적인 QC-LDPC 부호에 적용한 경우에도 유사한 오류 마루 개선 효과가 관찰되어, 제안 기법이 특정 표준 부호에 국한되지 않고 범용적으로 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

III. 결론

본 논문에서는 고신뢰도와 저지연이 요구되는 NTN 무선 통신 환경을 고려하여, 프로토그래프 기반 PBRL LDPC 부호의 오류 마루 성능을 개선하기 위한 트래핑 집합 제거 기반 시프트 값 변경 기법을 제안하였다. 반복 복호 실패 프레임의 LLR 거동을 분석하여 지배적인 트래핑 집합을 식별하고, 해당 트래핑 집합을 구성하는 일부 엣지의 시프트 값을 선택적으로 변경함으로써 오류 마루의 근본 원인을 구조적으로 제거하였다.

시뮬레이션 결과를 통해, 제안한 방법이 기존 부호의 폭포 구간 성능을 유지하면서도 BLER 오류 마루 구간에서 유의미한 성능 향상을 제공함을 확인하였다. 특히 본 기법은 기존 5G NR 표준에 정의된 PBRL LDPC 부호에 직접 적용 가능하며, 추가적인 복호 알고리즘 변경이나 부호 재설계 없이도 고신뢰 성능을 달성할 수 있다는 점에서 실용적인 장점을 가진다. 또한 일반적인 QC-LDPC 부호로의 확장 가능성 역시 확인되어, 차세대 NTN 및 고신뢰 통신 시스템에서의 활용 가능성을 제시한다.

향후 연구로는, 제안한 트래핑 집합 제거 기법을 제한된 반복 복호 환경이나 저지연 복호 스케줄링과 결합하는 방안, 그리고 다양한 채널 환경에서의 성능 분석을 통해 NTN 및 차세대 이동통신 시스템에 더욱 적합한 LDPC 부호 설계로 확장하는 것이 고려될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원으로 수행된 기초연구사업과 (RS-2025-25398164), 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 학석사연계ICT핵심인재양성사업 (RS-2022-00156385) 및 정보통신·방송 연구 개발 사업의 일환으로 하였습니다. [RS-2024-00348050, 3GPP 표준기반저궤도 위성통신 단말 핵심기술 개발]

참 고 문 헌

- [1] Richardson, Tom. "Error floors of LDPC codes." Proceedings of the annual Allerton conference on communication control and computing. Vol. 41. No. 3. The University; 1998, 2003.
- [2] Karimi, Mehdi, and Amir H. Banihashemi. "Efficient algorithm for finding dominant trapping sets of LDPC codes." IEEE Transactions on Information Theory 58.11 (2012): 6942-6958.
- [3] Karimi, Bashirreza, and Amir H. Banihashemi. "Construction of QC LDPC codes with low error floor by efficient systematic search and elimination of trapping sets." IEEE Transactions on Communications 68.2 (2019): 697-712.
- [4] Karimi, Bashirreza, and Amir H. Banihashemi. "Construction of irregular protograph-based QC-LDPC codes with low error floor." IEEE Transactions on Communications 69.1 (2020): 3-18.
- [5] Kumar, A. Dinesh, and Ambedkar Dukkupati. "A two stage selective averaging LDPC decoding." 2012 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings. IEEE, 2012.