

Differential Evolution 기반 Check-Regular LDPC 부호 설계 기법

이주형, 곽희열
울산대학교

wngud387@mail.ulsan.ac.kr, ghy1228@gmail.com

Design of Check-Regular LDPC codes Based on Differential evolution

Lee Ju Hyeong, Kwak Hee youl
Ulsan Univ.

요 약

본 논문은 Check degree 가 Regular 한 저밀도 패리티 검사 (low-density parity-check, LDPC) 부호를 differential evolution (DE) 기법을 사용하여 설계한다. 기존 density evolution 기반 설계 방법은 긴 길이의 LDPC 부호에 적합하나 짧은 길이 설계에는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 DE 기반 parity check matrix (PCM) 설계 방법이 제안되었으나 이는 2 차원 PCM 의 탐색 공간이 매우 커 DE 의 해가 수렴하지 않는다는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 DE 의 탐색 공간을 1 차원인 variable node degree distribution 으로 한정시키고 progressive edge growth (PEG) 알고리즘으로 check degree 가 regular 한 PCM 을 찾는 방법을 제안한다. 작아진 탐색 공간으로 제안하는 DE 는 더 우수한 최적해를 찾을 수 있다. 실험 결과, 제안하는 방법으로 설계한 LDPC 부호가 짧은 길이, 긴 길이 모두에서 기존 LDPC 부호들에 비해 수 order 이상 낮은 error rate 를 갖는다는 걸 확인하였다.

I. 서 론

저밀도 패리티 검사 (low-density parity-check, LDPC) 부호는 잡음이 많은 통신 채널을 통해 전송되는 데이터의 오류 감지 및 수정을 용이하게 하도록 설계된 부호이며, 샤넌 한계에 가까운 성능을 달성하는데 매우 효과적인 부호이다[1]. 이러한 부호는 parity check matrix (PCM)로 정의된다. 이 PCM 은 부호 성능을 결정하는 데 중요한 역할을 한다. 따라서 PCM 을 설계하기 위한 다양한 기법들이 논의되고 있다. 논문[2], [3]에서 제안한 기법은 differential evolution (DE)을 사용하여 PCM 을 설계하는 방법을 제안하였다. 하지만 2 차원의 PCM 의 탐색 공간이 매우 커 DE 의 해가 수렴하지 않는 단점이 있다. 본 논문에서는 DE 의 탐색 공간을 1 차원인 variable node degree distribution (DDs)으로 한정시키고 progressive edge growth (PEG)[4] 알고리즘으로 PCM 을 찾는 방법을 제안한다. 제안하는 방법과 기존 방법들의 자세한 비교는 <표 1>에 정리하였다.

II. 기존 LDPC 부호 설계 방법

논문[2]에서 제안한 설계 방법은 DE 의 mutation 에서 PCM 의 edge 를 추가하거나 제거하거나 node 간의 연결을 변경하고, crossover 에서 PCM 의 절반을 다른 PCM 의 절반과 결합하는 방식을 사용한다. Metric 은 decoder 를 실제로 돌려 구한 FER 를 기준으로 한다. 이와 유사하게, 논문[3]에서 제안한 설계 방법은 DE 의 mutation 에서 Base matrix 끼리 차분 연산을 진행하고, Base matrix 의 각 요소별로 crossover 를 하여 설계한다. Metric 은 density evolution 을 사용하여 구한 Threshold 를 기준으로 한다. 논문[2]의 방법은 PCM 을

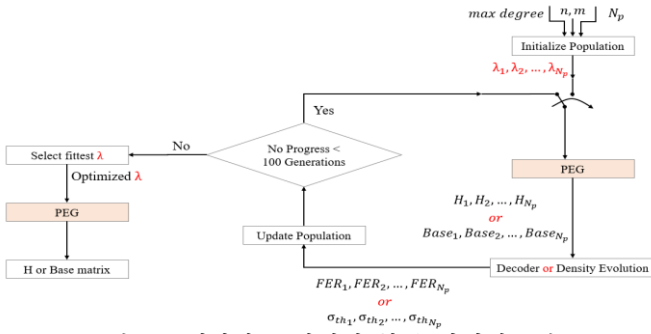
| | Target 길이 | 최적화 대상 | 최적화 Metric | 알고리즘 |
|-------|-----------|--------|------------|--------|
| 논문[2] | Short | PCM | FER | DE |
| 제안 1 | | DDs | | DE+PEG |
| 논문[3] | Long | Base | Threshold | DE |
| 제안 2 | | DDs | | DE+PEG |

<표 1> 제안하는 방법과 기존 방법들의 비교

최적화 대상으로 하여 짧은 길이 설계에 적합하며 논문 [3]은 Base matrix 를 최적화 하기에 긴 길이 설계에 적합하다. 하지만 이러한 설계 방법들은 2 차원인 PCM 또는 Base matrix 를 최적화 대상으로 하기에 최적화 탐색 공간이 너무 크다는 단점이 있다.

III. 제안하는 LDPC 부호 설계 방법

본 논문에서 제안하는 설계 방법은 initialize 단계에서 N_p 개의 DDs $\lambda_1, \dots, \lambda_{N_p}$ 를 랜덤하게 생성한다. Mutation 단계에서 각 DDs끼리 차분 연산을 진행하고, crossover 단계에서 각 DDs의 같은 degree별로 crossover를 한다. 이후 주어진 DDs로부터 PEG algorithm을 이용해 H 또는 Base를 생성한다. 이때 H와 Base는 variable node DDs는 λ_i 를 따르지만 check degree는 regular하다. 짧은 길이가 target일 경우는 H 를 생성하고 긴 길이를 target 할 경우 Base를 생성한다. 생성된 PCM을 Decoder를 통과시켜 frame error rate (FER), FER_i 을 구하고 Base는 density evolution으로 threshold, σ_i^{th} 을 구한다. Update Population 블록에서 더 좋은 성능을 갖는 DDs를 선택한다. 종료 조건은 100 세대 이상 진전 없을 시 종료한다. <그림 1>에 해당 과



<그림 1> 제안하는 방법의 블록 다이어그램

정을 요약하였다. 이러한 설계 방법은 DE가 1차원인 degree distribution을 찾기 때문에 논문[2], [3]의 방법보다 탐색 공간이 작아져 DE의 해가 수렴하기 쉽다는 장점이 있다. 하지만 PEG를 사용하였기에 PCM과 Base의 check node degree가 regular 해져 제한된 탐색공간에서의 local 최적해가 구해질 가능성이 있다. 그러나 check regular한 LDPC 부호가 실제 finite length 성능에서는 우수함을 실험 결과로 보인다. 즉, 실제 finite length 성능이 좋은 최적 탐색 공간으로 DE의 탐색 공간을 제한한 것으로 볼 수 있다.

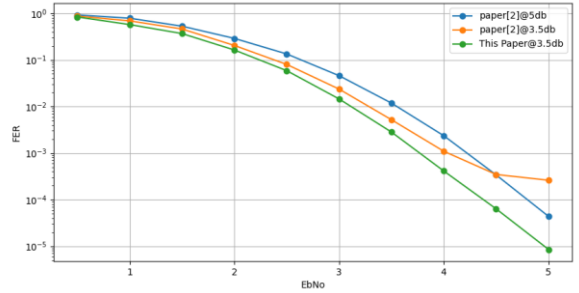
실험은 PCM을 설계할 때 max degree는 12, 부호 길이 n은 192, 부호율 r은 0.5로 하였다. Metric은 3.5dB 기준 FER로 하였다. <표 2>에 따르면 논문[2]에 비해 좋은 FER성능을 보임을 확인하였다. Base matrix를 설계할 때는 max degree는 33, 부호 길이 n은 224, 부호율 r은 0.5로 하였고, metric은 density evolution을 하여 얻은 threshold를 기준으로 하였다. <표 2>와 같이 Threshold는 논문 [3]에 비해 열화 되어 있다. 하지만 실제 유한 길이 성능 실험에서 제안하는 방법이 더 우수함을 보인다.

| | Target 길이 | 최적화 Metric | 결과 |
|-------|-----------|------------|----------|
| 논문[2] | Short | FER(3.5dB) | 5.19e-03 |
| 제안 1 | | | 2.82e-03 |
| 논문[3] | Long | Threshold | 0.3 |
| 제안 2 | | | 0.368 |

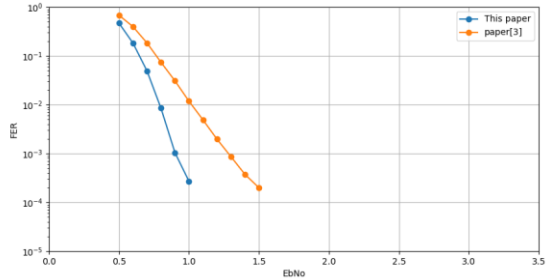
<표 2> 실험 결과

IV. AWGN 채널에서의 복호 성능

모의 실험에서 본 논문에서 제안한 방법과 논문 [2], [3]에서 제안한 방법을 additive white Gaussian noise (AWGN) 채널에서 비교하였고 결과는 <그림 1>, <그림 2>와 같다. 복호 방식은 SPA (Sum-Product Algorithm)이며, max iteration 은 10 으로 제한하였다. 모의 실험을 통해 찾은 부호가 논문[2]의 부호보다 성능이 좋음을 알 수 있다. 논문[2]의 기법은 3.5dB 에서 FER 을 최적화 metric 으로 설계 했을 때 error floor 가 나타나는 걸 볼 수 있고, 5dB 를 target 으로 설계했을 때는 error rate 가 본 논문의 방법으로 설계한 부호보다 낮음을 볼 수 있다. 또한 <그림 2>에서 본 논문에서 제안한 방법과 논문[3]에서 제안한 방법을 비교하였다. Base matrix 를 길이 9856 인 PCM 으로 lifting 하였고 결과는 <그림 2>와 같다. 논문[3]의 기법으로 설계한 부호보다 error rate 가 낮음을 볼 수 있다. 이는 제안하는 설계 기법이 error floor 성능이 좋은 check regular 한 특징을 갖게 하기 때문이다.



<그림 1> 논문[2]와 본 논문의 FER 비교



<그림 2> 논문[3]과 본 논문의 FER 비교

V. 결론

본 논문에서는 Differential evolution을 사용하여 LDPC 부호를 설계하는 새로운 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 방법이 기존의 방법보다 적은 탐색 공간을 가져 DE의 해가 쉽게 수렴할 수 있다는 장점을 보인다. 이에 따라 제안하는 설계 방법이 기존의 방법보다 수 order 이상 낮은 FER을 갖는다는 걸 모의 실험을 통해 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-00247197, LDPC 부호의 한계 극복으로 응용 분야 확대)

참고 문헌

- [1] A. Shokrollahi, "Ldpc codes: an introduction," Technical Report, Digital Fountain, Inc., Apr. 2003.
- [2] A. Elkelesh et al., "Decoder-in-the-Loop: Genetic Optimization-Based LDPC Design," IEEE Access, vol. 7, Sept. 2019, pp. 141,161- 70
- [3] Pradhan, A. Thangaraj, and A. Subramanian, "Construction of near-capacity protograph LDPC code sequences with blockerror thresholds," IEEE Trans. Commun., vol. 64, no. 1, pp. 27- 37, Jan. 2016.
- [4] X.-Y. Hu, E. Eleftheriou, and D. Arnold, "Regular and irregular progressive edge-growth tanner graphs", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, no. 1, pp. 386- 398, Jan. 2005.