



다양한 복호 알고리즘과 스케줄링 기법에 따른 LDPC 부호 성능에 관한 연구

채상원, 김강산, 최효정, 송홍엽
연세대학교

안종선
한국항공우주연구원



목차

- 서론
- 본론
 - AWGN 채널
 - LDPC 부호
 - 복호 알고리즘
 - 스케줄링 기법
 - 시뮬레이션 설정
 - 시뮬레이션 결과
- 결론



서론

- 서론
- 본론
 - AWGN 채널
 - LDPC 부호
 - 복호 알고리즘
 - 스케줄링 기법
 - 시뮬레이션 설정
 - 시뮬레이션 결과
- 결론



서론

- LDPC 부호[1]는 뛰어난 오류 정정 성능을 보이며 현재 여러 디지털 통신 및 방송 표준에 널리 채택됨[2].
- 이러한 광범위한 실용성 덕분에 LDPC 부호에 관한 이론 및 응용 연구가 꾸준히 진행되고 있음.
- 복호 알고리즘과 스케줄링 방법의 개선을 통해 연산 복잡도와 오류 정정 능력 간의 균형을 맞추는 문제는 주요 연구 주제 중 하나임.

[1] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21–28, Jan. 1962.

[2] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 2008.



본론

- 서론
- 본론
 - AWGN 채널
 - LDPC 부호
 - 복호 알고리즘
 - 스케줄링 기법
 - 시뮬레이션 설정
 - 시뮬레이션 결과
- 결론



AWGN 채널

- 본 논문에서 단순 가산성 백색 가우스 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN) 채널을 다음과 같이 모델링함[2].

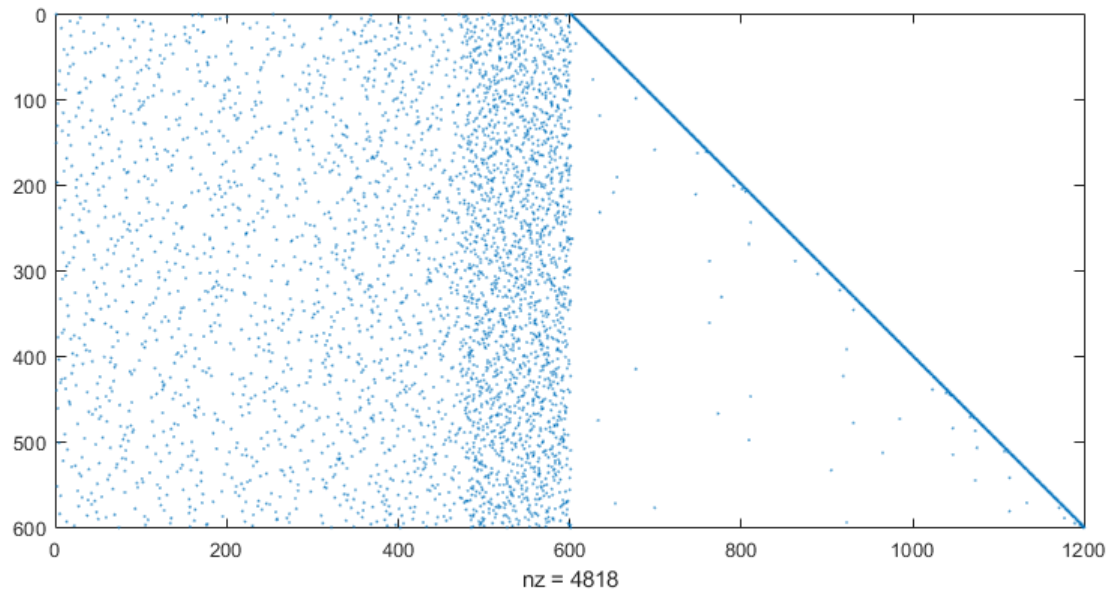
$$y_i = x_i + z_i, \quad i = 1, 2, \dots,$$

- y_i : 수신한 신호
- x_i : BPSK(Binary Phase Shift Keying)-변조된 신호
- z_i : AWGN, $Z \sim \mathcal{N}(0, N_0/2)$ 의 관측값



LDPC 부호

- 본 논문의 시뮬레이션에 사용한 LDPC 부호는 [3]에서 정의된 GPS L1C Subframe 2에 사용된 (1200, 600) 비균일 LDPC 부호.
 - 부호율은 1/2.
 - 변수 노드의 차수는 2부터 15까지 분포.
 - 검사 노드의 차수는 8 또는 9.



[3] NAVSTAR GPS Space Segment/ User Segment L1C Interfaces, IS-GPS-800J, 2022.



복호 알고리즘

- 본 논문에서 세 가지 복호 알고리즘(검사 노드 연산 방식)을 사용함.
 - Sum-Product
 - Normalized Min-Sum ($\alpha = 0.75$)
 - Offset Min-Sum ($\beta = 0.5$)
- 표기법
 - c_i : i 번째 검사 노드
 - v_j : j 번째 변수 노드
 - $L_{X \rightarrow Y}$: X 에서 Y 로 보내는 메시지의 우도비(log-likelihood ratio).
 - $\mathcal{N}(c_i) \setminus \{v_j\}$: 검사 노드 i 와 이웃한 모든 변수 노드들 중 v_j 를 제외한 집합



복호 알고리즘

- Sum-Product (SP)[4]

$$L_{c_i \rightarrow v_j} = 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{v' \in \mathcal{N}(c_i) \setminus \{v_j\}} \tanh \left(\frac{L_{v' \rightarrow c_i}}{2} \right) \right).$$

- 정확한 확률 정보를 고려하는 방식.
- 높은 성능을 보이나 $\tanh, \tanh^{-1}$ 함수로 인해 연산이 많음.

[4] Kschischang, B. J. Frey, and H. -a. Loeliger, "Factor graphs and the sum-product algorithm," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 498–519, Jan. 2001.



복호 알고리즘

- Normalized Min-Sum (NMS)[5]

$$L_{c_i \rightarrow v_j} = \alpha \times \prod_{v' \in \mathcal{N}(c_i) \setminus \{v_j\}} \text{sgn}(L_{v' \rightarrow c_i}) \times \min_{v' \in \mathcal{N}(c_i) \setminus \{v_j\}} |L_{v' \rightarrow c_i}|.$$

- Min-Sum 알고리즘[6]의 검사 노드 업데이트에 정규화 계수 $\alpha < 1$ 를 곱함.

[5] J. Chen and M. P. C. Fossorier, "Density evolution for two improved BP-Based decoding algorithms of LDPC codes," *IEEE Communications Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 208–210, May 2002.

[6] M. P. C. Fossorier, M. Mihaljevic, and H. Imai, "Reduced complexity iterative decoding of low-density parity check codes based on belief propagation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 5, pp. 673–680, May 1999.



복호 알고리즘

- Offset Min-Sum (OMS)[5]

$$L_{c_i \rightarrow v_j} = \prod_{v' \in \mathcal{N}(c_i) \setminus \{v_j\}} \text{sgn}(L_{v' \rightarrow c_i}) \times \max \left(\min_{v' \in \mathcal{N}(c_i) \setminus \{v_j\}} |L_{v' \rightarrow c_i}| - \beta, 0 \right).$$

- Min-Sum 알고리즘의 검사 노드 업데이트에 오프셋 계수 β 만큼을 뺀.

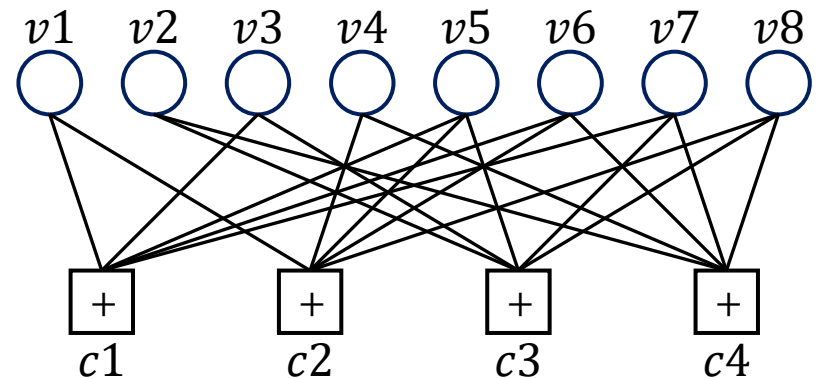


스케줄링 기법

- 본 논문에서 세 가지 스케줄링 기법을 사용함.
 - Flooding
 - Layered Belief Propagation
 - Residual Belief Propagation

- 예시

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$



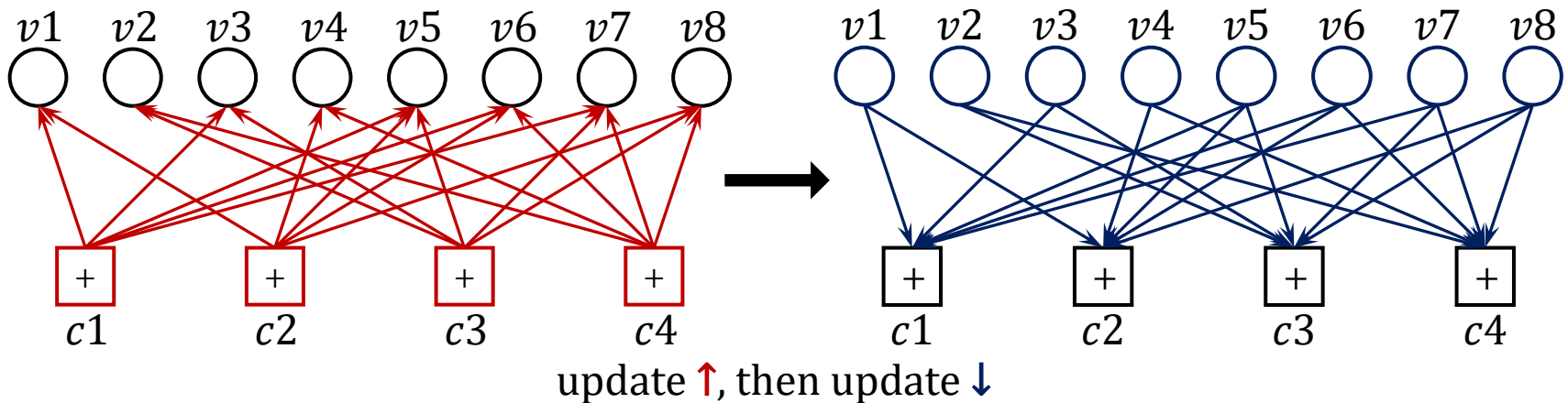


스케줄링 기법

- Flooding[1, 7]

- 각 반복에서 먼저 모든 변수 노드가 이웃 검사 노드로 메시지를 전달하고, 이어서 모든 검사 노드가 이웃 변수 노드로 메시지를 전달함[1,7].

- 병렬 구현이 쉬움.



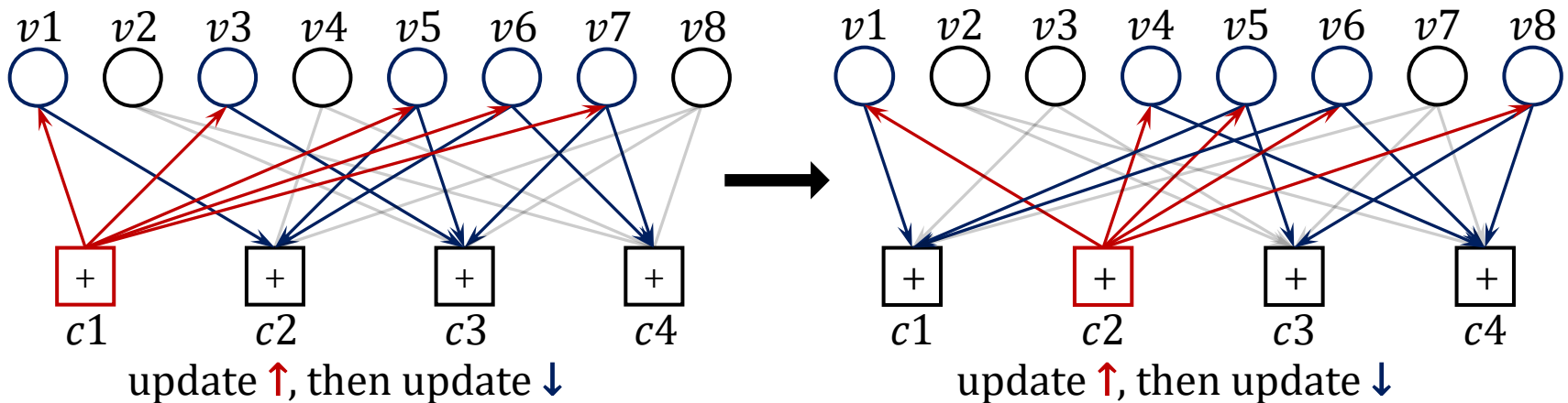
[7] Kschischang and B. J. Frey, "Iterative decoding of compound codes by probability propagation in graphical models," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 2, pp. 219–230, Jan. 1998.



스케줄링 기법

- Layered Belief Propagation (LBP)[8]

- 레이어마다 검사 노드 메시지를 업데이트하고, 이웃한 변수 노드 메시지를 업데이트함.
- Flooding에 비해 빠르게 수렴, 같은 최대 반복 횟수에서 더 좋은 성능을 보임.



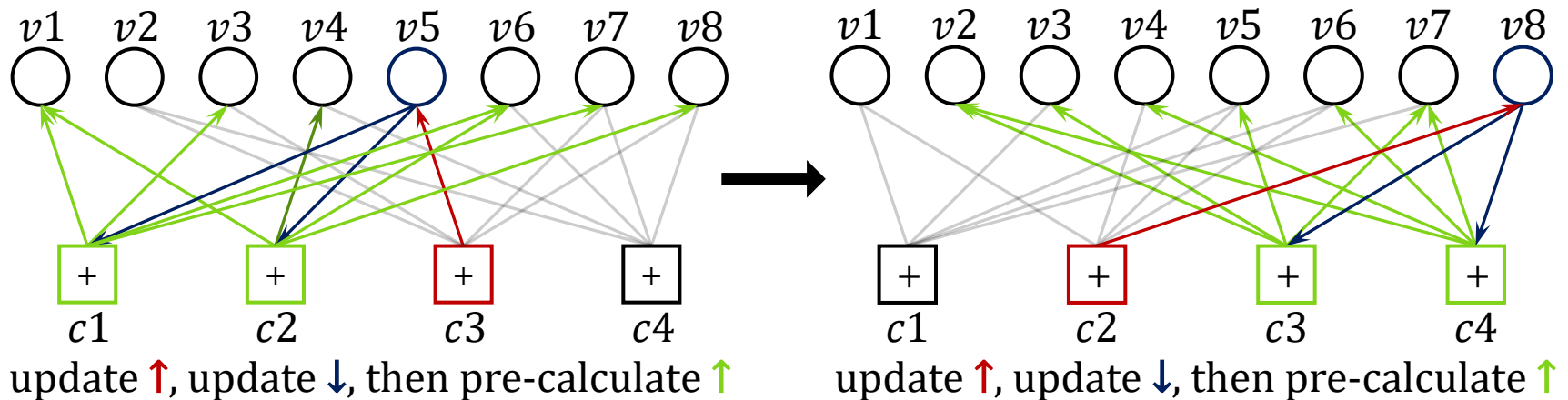
[8] D. E. Hocevar, "A Reduced Complexity Decoder Architecture via Layered Decoding of LDPC Codes," *IEEE Workshop on Signal Processing Systems*, pp. 107–112, Dec. 2004.



스케줄링 기법

- Residual Belief Propagation (RBP)[9]

- 각 메시지 전달 전후의 절대 변화량(Residual)을 기준으로 우선순위를 정함.
- 더 많이 수렴이 필요한 부분부터 정보를 전파하여 빠르게 수렴할 수 있음.
- 메시지 변화량을 추가로 계산하기에 연산 횟수가 매우 많음.



[9] G. Elidan, I. McGraw, and D. Koller, "Residual belief Propagation: informed scheduling for asynchronous message passing," *Uncertainty in Artificial Intelligence*, pp. 165–173, Jul. 2006.



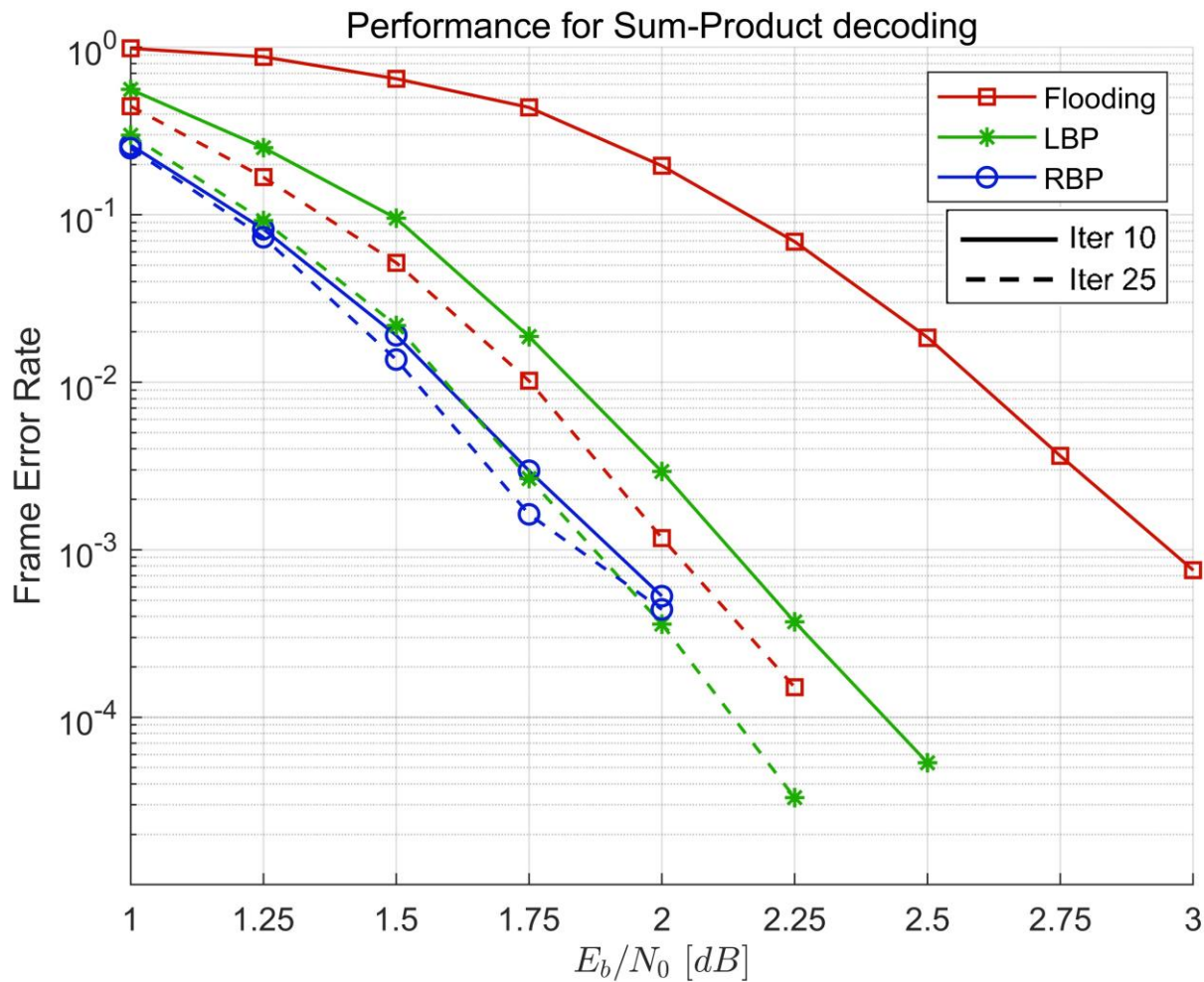
시뮬레이션 설정

- Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하여 주어진 에너지 대 잡음 전력 스펙트럼 밀도 비율 (E_b / N_0) 대비 프레임 오류율 (Frame Error Rate, FER) 곡선을 그림.
- 스케줄링의 최대 반복 횟수를 10회와 25회로 설정함.



시뮬레이션 결과

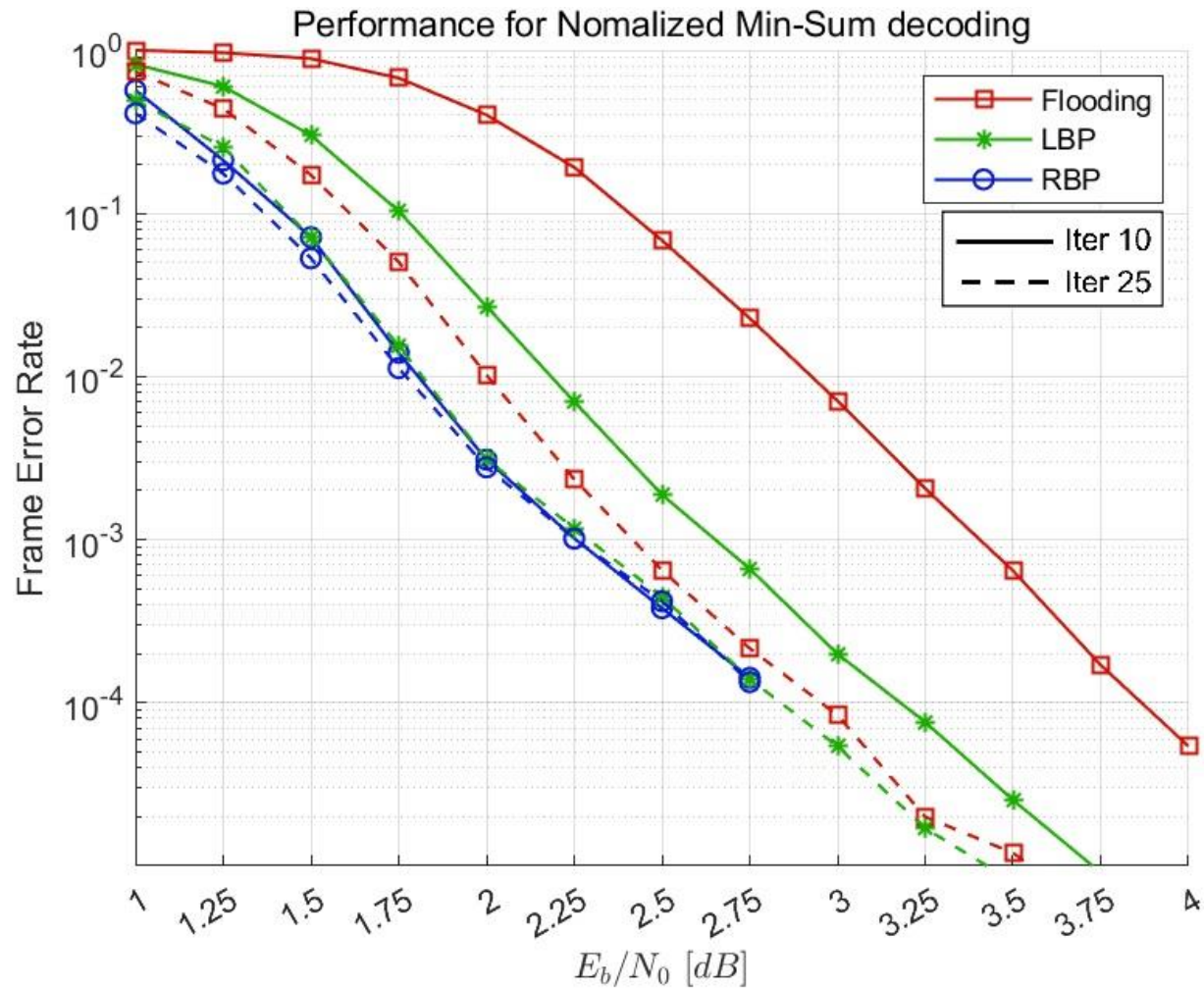
- SP 알고리즘 성능 비교





시뮬레이션 결과

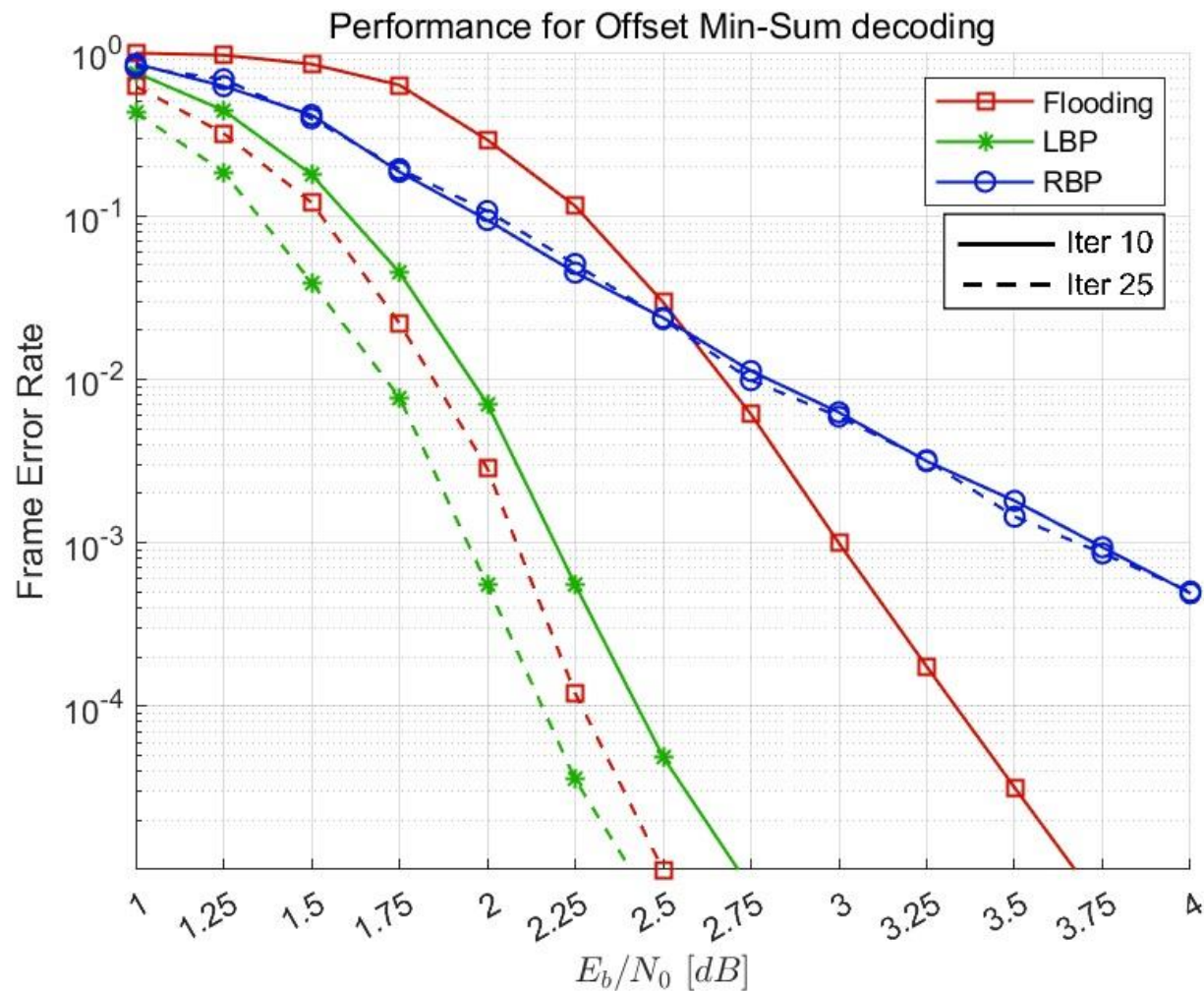
- NMS 알고리즘 성능 비교.





시뮬레이션 결과

- OMS 알고리즘 성능 비교





시뮬레이션 결과

- FER 5×10^{-4} , 최대 반복 횟수 10회 기준

	Flooding	LBP	RBP
SP	3.1dB	2.2dB	2.0dB
NMS	3.5dB	2.8dB	2.5dB
OMS	3.1dB	2.3dB	4.0dB

- FER 5×10^{-4} , 최대 반복 횟수 25회 기준

	Flooding	LBP	RBP
SP	2.1dB	2.0dB	2.0dB
NMS	2.5dB	2.5dB	2.5dB
OMS	2.1dB	2.0dB	4.0dB



결론

- 서론
- 본론
 - AWGN 채널
 - LDPC 부호
 - 복호 알고리즘
 - 스케줄링 기법
 - 시뮬레이션 설정
 - 시뮬레이션 결과
- 결론



결론

- 본 논문에서는 LDPC 부호에 대해 다양한 복호 알고리즘과 스케줄링 기법의 성능을 최대 반복 횟수를 달리 하여 비교함.
- SP와 OMS 알고리즘이 상대적으로 우수한 오류 정정 성능을 보였고, NMS 알고리즘의 성능이 다소 낮았음.
- LBP 기법이 Flooding 기법보다 더 빠른 수렴과 높은 성능을 보였고, RBP 기법은 LBP 기법보다도 더 빠른 수렴을 보였음.
- 다만 OMS 알고리즘에서 RBP 스케줄링 적용 시, 다른 알고리즘 및 스케줄링 대비 성능이 크게 떨어지는 경향이 확인됨.



THE END

CCL

감사합니다.