

MMSE-PIC 검출 기반 저복잡도 LDPC 부호화 매시브 MIMO 시스템 설계

박한진^o 정희상 최성우

이정우

한국전자통신연구원

중앙대학교

6G 무선액세스시스템연구실

전자전기공학부

Design of a Low-Complexity LDPC-Coded Massive MIMO System Based on MMSE-PIC Detection

Han Jin Park^o Heesang Chung Sung-Woo Choi Jeong Woo Lee

6G Wireless Access

Electrical and Electronics

System Research Section

Engineering

ETRI

Chung-Ang University

phj0304@etri.re.kr hschung@etri.re.kr csw9908@etri.re.kr jwlee2@cau.ac.kr

요 약

본 논문은 매시브 MIMO 시스템에 널리 사용되는 검출기법인 MMSE-PIC 기반의 Gauss-Seidel-aided MMSE-PIC 와 LDPC code 를 고려한 시스템 설계법에 관한 논문이다. 본 논문에서는 저복잡도 시스템을 설계하기 위해, 저복잡도를 보장하는 신호검출기법인 Gauss-Seidel-aided MMSE-PIC 를 고려했으며, 기존의 설계법보다 BER 성능수렴 속도를 높여 저복잡도를 만족하는 시스템 설계법을 제안한다. 시스템 내의 데이터의 흐름을 파악하여 EXIT 분석을 한다. EXIT 분석을 통해 설계된 시스템은 기존보다 저복잡도를 만족하면서, 기존보다 우수한 성능을 보장한다.

1. 시스템 모델

본 논문은 Uplink 무선통신 시스템을 고려했으며, 그림 1.에 시스템모델을 표현했다. Users n_T 의 장비는 송신안테나 하나를 보유하며, 기지국은 다수의 수신안테나 n_R 를 보유한다고 가정하였다. 각 user 는 K 개의 Information bits 를 LDPC Encoder 를 통해 N 개의 Codewords 를 생성한다. 각 user 는 Modulator 를 통해 QPSK symbol M 맵핑 한다. $Q = N \log_2 M$ 개의 symbol 을 생성하고, 각 user 는 symbol 을 Q channel 을 통하여 동시에 기지국으로 전송한다. $S_{n_T}^{(q)}$ 은 n_T 번째 user 의 q 번째 channel 을 통과한 전송 심볼이며, $\mathbf{S}^{(q)} = [s_1^{(q)}, s_2^{(q)}, s_3^{(q)}, \dots, s_{n_T}^{(q)}] \in \mathbb{C}^{n_T \times 1}$ 로 정의했다. 기지국의 수신신호 $\mathbf{Y}^{(q)} = [y_1^{(q)}, \dots, y_{n_R}^{(q)}]^T$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y}^{(q)} = \mathbf{H}^{(q)}\mathbf{S}^{(q)} + \mathbf{N}^{(q)}, q = 1, \dots, Q, \quad (1),$$

여기서 $\mathbf{H}^{(q)}$ 의 각 요소는 channel gain 을 $\mathbf{N}^{(q)} = [n_1^{(q)}, \dots, n_{n_R}^{(q)}]^T$ 은 noise 를 의미한다.

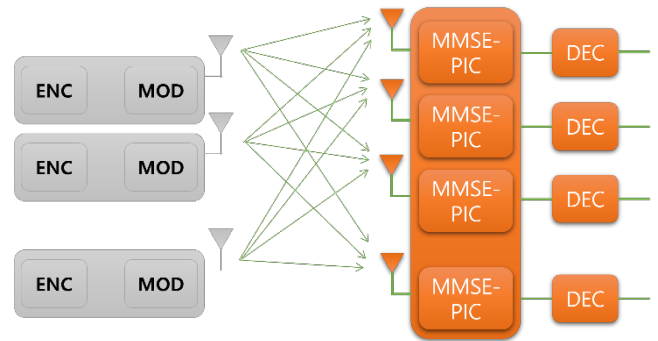


그림 1. 시스템모델

2. 반복 검출 및 복호 기법

Gauss-Seidel-aided MMSE-PIC 는 MMSE-PIC 의 nulling matrix $\mathbf{W}^{(l)H}$ 의 역행렬 연산을 Gauss-Seidel 근사기법을 적용시킨 저복잡도 신호검출 기법이다[1]. 기존의 시스템 설계법은 신호검출 반복연산, 역행렬 근사 반복연산, LDPC decoder 반복 연산 비율 $N_{det}:N_{GS}:N_{dec} = 1:1:1$ 로 설계하였다. 하지만 보다

다양한 반복연산 비율을 EXIT 분석을 통해 BER 성능 수렴속도를 예측했다[2]. 그 결과, 기존의 설계법보다 BER 수렴 속도가 빠르다.

3. 실험 결과 및 분석

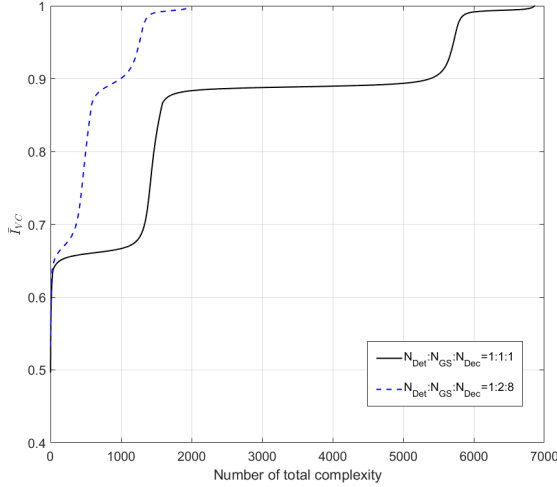


그림 2. EXIT 분석을 통한 BER 성능수렴속도 예측

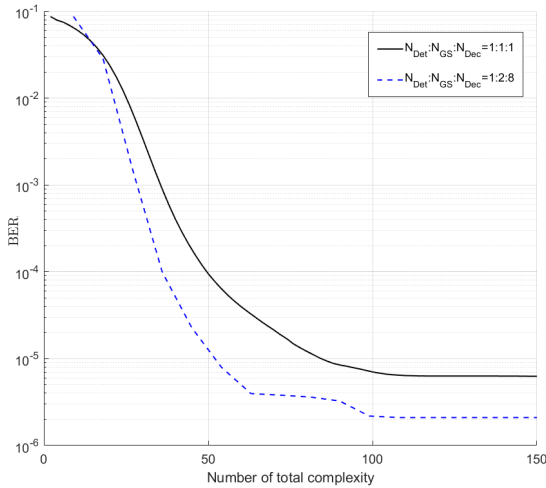


그림 3. BER 성능 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 BER 성능 수렴속도 예측과 실제 BER Simulation 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 그림 2 에서 기존 설계법인 $N_{det}:N_{GS}:N_{dec} = 1:1:1$ 보다 BER 성능 수렴속도가 빠른 조합을 찾았다. 그림 3 에서는 실제 BER 성능 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있다.

4. 결론

제한한 EXIT 분석 및 설계법을 활용한다면, 기존 설계법보다 저복잡도를 만족하는 시스템을 만들 수 있다.

5. 사사문구

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00397216, (총괄 1-세부 1) Upper-mid Band Extreme massive MIMO(E-MIMO) 시스템 기술 개발).

6. 참고 문헌

- [1] M. Zhang and S. Kim, "Evaluation of MMSE-Based Iterative Soft Detection Schemes for Coded Massive MIMO System," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 10166-10175, 2019.
- [3] S. ten Brink, "Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 10, pp. 1727-1737, Oct. 2001.