

블록 페이딩 채널에서 극 부호의 IR-HARQ 성능 분석

박지상, 주효상, 김상호*

성균관대학교 정보통신대학*

iamshkim@skku.edu*

On the Performance of Polar Coded IR-HARQ over Block Fading Channel

Jisang Park, Hyosang Ju, Sang-Hyo Kim*

Department of Electronics and Computer Engineering, Sungkyunkwan Univ.*

요약

극 부호의 개량된 Incremental redundancy-Hybrid automatic repeat request (IR-HARQ) 방법은 재송 과정에서 부호어 길이를 확장함과 동시에 패리티 쌍을 생성하여 AWGN 및 빠른 페이딩 채널에서 성능을 개선한다. 하지만 재송 시점 간에 채널 상태가 크게 변화하는 경우 패리티 쌍에 의해 오히려 성능이 감소할 수 있으며, 이러한 현상에 대해 본 논문에서 분석한다.

I. 서론

HARQ는 순방향 오류 정정(forward error correction: FEC)과 자동 반복 요청(automatic repeat request: ARQ)을 융합한 기술로서 3G (3rd generation) 모바일을 위한 code division multiple access (CDMA) 2000, 4G long term evolution (LTE) 등에 널리 이용되었다 [1]. 5G New radio (NR)에서도 HARQ를 이용하며, LTE와는 달리 좀 더 유연한 ACK 피드백 제한을 두고 있다. 따라서 ultra reliable low latency communication (URLLC)와 같이 피드백 제한이 엄격한 시나리오에서는 매우 짧은 피드백이 요구될 수 있으며, 재전송 횟수를 최소화하는 것이 바람직하다.

HARQ 타입은 부호어 전체를 재전송하는 타입-I (chase combining HARQ: CC-HARQ)와 타입-II, III (incremental redundancy HARQ: IR-HARQ)로 구분된다. CC-HARQ와 달리 IR-HARQ는 부호어의 일부분을 전송함으로써 더 높은 스루풋(throughput)을 달성할 수 있다. 뿐만 아니라 부호 길이 확장을 통해 IR-HARQ의 성능 개선 효과를 향상시킨 바 있다. Low density parity check (LDPC) 부호의 경우 NACK 수신에 한하여 추가 패리티 생성을 통해 블록 페이딩 채널에서 성능을 개선하였다 [2]. 극 부호의 경우 부호 길이 확장을 통해 AWGN 및 빠른 페이딩 채널에서 성능을 개선할 수 있다 [3]. 그러나 LDPC 부호와 달리 초송과 재송 시점 간 시간 차로 인해 채널이 크게 변화할 경우, 양극화 커널(kernel) 특성에 의해 새로 생성된 패리티 비트들이 망가지는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 현상에 대해 분석하여, 재송 과정에서 추가 생성된 데이터 비트 개수가 증가할수록 성능 저하의 폭이 커질 수 있음을 확인한다.

II. 본론

A. 극 부호

극 부호는 채널 용량을 달성하기 위해 고안된 채널 부호 중의 한 유형이며, 채널 양극화 현상에 기반하여 부호를 설계한다 [4]. 채널 양극화 현상이란 $N=2^m$ 개의 채널 \mathcal{W} 에 대해 채널 합성 및 채널 분리 과정을 거쳐 얻어진 N 개의 서로 다른 비트 채널 $\mathcal{W}_N^{(i)}$ 가 \mathcal{W} 에 비해 채널 용량이 개선된 그룹과 저하된 그룹으로 구분되어지는 현상이다. 양극화 된 채널 중 채널 용량 $I(\mathcal{W}_N^{(i)})$ 가 우수한 K 개의 채널에는 정보 비트를, 나머지 $N-K$ 개

의 채널에는 송수신기 간 사전 약속된 고정 비트를 할당하여 부호어 $R=K/N$ 인 (N, K) 극 부호를 설계한다. 이 때 정보비트로 선택된 비트의 인덱스 집합을 \mathcal{A} , 고정 비트로 선택된 비트의 인덱스 집합을 \mathcal{F} 로 정의한다. N 이 증가함에 따라 R 이 $NI(\mathcal{W})$ 에 수렴하며, 이는 극 부호가 이론적으로 채널 용량을 달성함을 의미한다.

극 부호의 설계 방법 중 하나인 양극화 가중치(polarization weight: PW) 시퀀스는, 다양한 채널 수준에서 안정적인 성능을 보장하는 부호 시퀀스이다 [5]. 따라서 송신단과 수신단에서 \mathcal{A}, \mathcal{F} 를 고정적으로 사용 가능하며, 이를 바탕으로 구성된 소스 데이터 $u_0^{N-1} = [u_0, u_1, \dots, u_{N-1}]$ 을 구성한 뒤, 극 부호어 $x_0^{N-1} = u_0^{N-1} G_N$ ($G_N = F^{\otimes m}, F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$)를 생성할 수 있다.

극 부호의 연속 제거(successive cancellation: SC) 복호 방법은 소스 비트를 순차적으로 추정하며, 하나의 정보 비트를 추정할 때 마다 신뢰도가 가장 우수한 하나의 추정 결과만을 선택한다 [4]. u_i 의 신뢰도 메트릭으로 로그 우도 비(log-likelihood ratio: LLR) (1)에 기반한 경로 메트릭(path metric) (2)을 활용할 경우 메트릭 값이 낮을수록 추정 결과의 신뢰도가 높다. 이 때 p 는 경로 인덱스, $\hat{u}_i[p]$ 는 경로 p 에서 u_i 의 추정 값을 나타낸다. 소스 비트에 대한 LLR 값은 최초 채널에서 수신한 LLR $l_1^{(i)}$ ($i=0, 1, \dots, N-1$)로부터 검사 노드 및 변수 노드의 연산 (3), (4)를 반복하여 이루어진다. $l^{(i)}, l^{(i)}$ 는 각각 업데이트 전과 후의 i 번째 LLR, \hat{v}_i 는 i 번째 부분 합을 나타낸다.

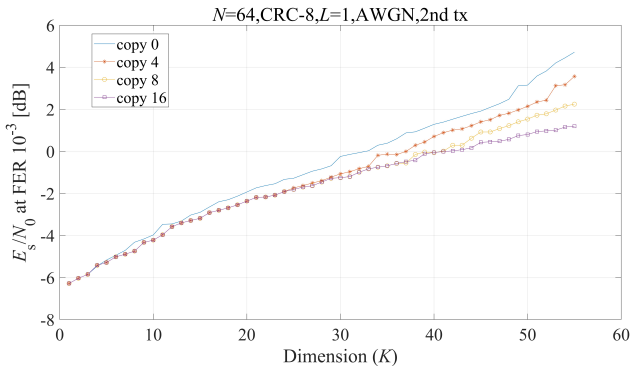
$$l_N^{(i)} = \ln \frac{W_N^{(i)}(y_0^{N-1}, \hat{u}_0^{i-1} | u_i = 0)}{W_N^{(i)}(y_0^{N-1}, \hat{u}_0^{i-1} | u_i = 1)} \quad (1)$$

$$PM_p^{(i)} = \begin{cases} PM_p^{(i-1)} & (-1)^{\hat{u}_i[p]} = \text{sign}(l_N^{(i)}) \\ PM_p^{(i-1)} + |L_N^{(i)}| & (-1)^{\hat{u}_i[p]} \neq \text{sign}(l_N^{(i)}) \end{cases} \quad (2)$$

$$l^{(i)} = \text{sign}(l^{(i)}) \text{sign}(l^{(i+2^{m-1})}) \min\{|l^{(i)}|, |l^{(i+2^{m-1})}|\} \quad (3)$$

$$l^{(i+2^{m-1})} = (-1)^{\hat{v}_i} l^{(i)} + l^{(i+2^{m-1})} \quad (4)$$

연속제거 리스트(SC list: SCL) 복호 방법은 SC 복호 방법과 달리 가장 신뢰도가 높은 복호 후보 L 개를 관리한다 [6]. 매 비트 추정 단계마다 복호 후보들의 리스트를 갱신하며, 마지막에는 가장 신뢰도가 높은 것을 복호 결과로 선택한다. 추가적인 성능 개선을 위해 순환 중복 검사(cyclic redundancy check: CRC) 부호를 극 부호 부호기 앞서 적용할 수 있으며,

그림 1. AWGN 채널에서 재송 성능 분석 ($N=64$)

이 경우 SCL 복호 마지막 단계에서 신뢰도의 내림차순으로 CRC 검사를 진행하여 가장 먼저 검사를 통과하는 후보를 복호 결과로 선택한다 [7].

B. Hybrid automatic repeat request (HARQ)

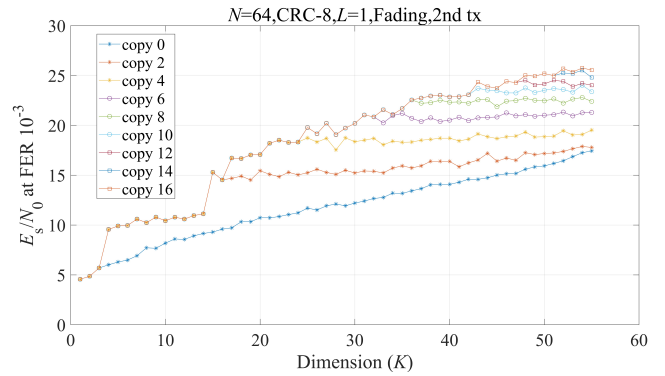
HARQ를 활용한 통신에서는 최초 전송된 패킷의 오류 정정에 성공하면 ACK, 실패하면 NACK 신호를 송신단으로 전송한다. NACK 신호를 수신한 경우 해당 패킷을 재전송하게 되며, 재전송하는 방식에 따라 CC-HARQ와 IR-HARQ로 구분한다. 연구 [3]에서 제안된 IR-HARQ는 기존의 IR-HARQ와 달리 재전송 단계에서 양극화 커널 특성을 활용하여 부호어 길이를 확장하는 방법을 통해 CC-HARQ 보다 우수한 성능을 달성하였다. 이 방법은 극 부호의 커널 특성에 따라 비트 구성이 그대로 유지되므로 이전 단계에 전송된 비트들의 전송을 생략할 수 있다. 이를 통해 매 전송마다 N 비트만큼 일정하게 전송 가능하며, t 번째 전송 단계에서 모부호 길이를 $N^{(t)} = 2^{\lceil \log_2 N \rceil}$ 로 확장할 수 있다. t 번째 전송 때 정보 비트 인덱스의 구성을 $\mathcal{A}^{(t)}$, $t+1$ 번째 전송 때 정보 비트 인덱스 구성을 $\mathcal{A}^{(t+1)}$ 라 하면, $\mathcal{A}^{(t)}$ 에만 포함된 위치와 $\mathcal{A}^{(t+1)}$ 에만 포함된 위치 간에 일대일 패리티 관계를 정의한다. $\mathcal{A}^{(t)}$ 에만 포함된 인덱스들의 집합을 $\mathcal{A}_{\text{ex}}^{(t)}$, $\mathcal{A}^{(t+1)}$ 에만 포함된 인덱스들의 집합을 $\mathcal{A}_{\text{ex}}^{(t+1)}$ 라 정의하면, $C' (=|\mathcal{A}_{\text{ex}}^{(t)}| = |\mathcal{A}_{\text{ex}}^{(t+1)}|)$ 개의 패리티 쌍이 생성된다. 인코딩 할 때는 $\mathcal{A}_{\text{ex}}^{(t)}$ 에 속하는 위치에서 $\mathcal{A}_{\text{ex}}^{(t+1)}$ 에 속하는 위치로, 디코딩 때에는 그 반대 방향으로 비트 값을 복사(copy)한다. 예로 (8,5) 극 부호의 경우 PW 시퀀스 기준 $\mathcal{A}^{(1)} = \{3,4,5,6,7\}$, $\mathcal{A}^{(2)} = \{7,11,13,14,15\}$ 이므로 $N^{(2)} = 16$ 에서 인코딩 때 u_{12} 값을 u_7 으로 복사하며, 디코딩 때에는 \hat{u}_7 값을 \hat{u}_{12} 로 복사한다.

III. 블록 페이딩 환경에서 적응적 HARQ-IR 극부호 성능 분석

채널 LLR은 채널 상태 h , 잡음 분산 σ^2 에서 $l = 2hy/\sigma^2$ 로 계산된다. 즉 페이딩을 겪은 신호에 대한 LLR은 일반적으로 그 크기가 상당히 작아지는 경향이 존재한다. IR-HARQ 시나리오에서는 각 전송 단계마다 서로 다른 시점에 전송된 심볼 간 채널 상태가 달라질 수 있다. 특히 극 부호는 검사 노드의 LLR 업데이트로 인해 인덱스가 낮은 비트 쪽의 LLR이 작아지는 경향이 있어, 변형된 IR-HARQ의 재송 단계에서 생성된 비트들의 신뢰도가 크게 저하될 수 있다. 이러한 현상은 그림 1,2를 통해 확인할 수 있다. 해당 그림은 각각 AWGN, 페이딩 채널에서 $N=64$ 인 극 부호의 두

표 1. $N=64$ 에서 정보 비트 수에 따른 복사 비트 수 ($t=2$)

C	1	2	3	4	5	6	7	8
$\mathcal{A}^{(1)}$	12-22	23-24	25-28	29-32	33-37	38-40	41-43	44
C	9	10	11	12	13	14	15	16
$\mathcal{A}^{(1)}$	45-48	49-50	51-53	54-55	56-57	58-59	60-62	63

그림 2. Fading 채널에서 재송 성능 분석 ($N=64$)

번째 전송 때 SC 복호 성능을 나타낸다. PW에 기반하여 \mathcal{A} , \mathcal{F} 를 정의하였으며, $N^{(2)} = 128$ 로 확장하면서 생성되는 복사 비트의 수는 표 1과 같이 결정된다. 이 때, 생성되는 패리티 쌍의 수를 C_{lim} 개 까지만 생성한 경우를 Copy C_{lim} 으로 표기하였다. AWGN 채널의 경우 높은 $|\mathcal{A}^{(1)}|$ 를 갖는 K 위치에서 C 의 개수가 높을수록 성능 개선 효과가 높아진다. 그러나, 블록 페이딩 환경에서는 복사 비트의 수가 늘어나는 K 부터 성능이 급격히 저하되는 현상을 보인다. 따라서 블록 페이딩 환경에서 복사 생성된 비트들에 대해 새로운 복호 방법이 필요하다.

IV. 결 론

극 부호의 개량된 IR-HARQ 방법은 최초 복호에 실패한 데이터를 재송할 때 부호 길이를 확장함과 동시에 새로 생성된 소스 비트의 위치에 데이터 비트의 일부를 복사하여 복호 성공률을 개선한다. 그러나 블록 페이딩 환경에서는 복사 비트의 사용으로 인해 역으로 성능 저하가 발생할 수 있다. 따라서, 블록 페이딩 환경에서 복사 비트에 대해 적합한 복호 방법을 연구할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. 2021-0-00794, 3차원 공간 이동통신 기술 개발)과 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1A2C1008913).

참 고 문 헌

- [1] A. Ahmed, et al., "Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) in Wireless Communications Systems and Standards: A Contemporary Survey," IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 4, 4th Quarter, 2021.
- [2] C. Kim, S.-H. Kim, J.-S. No, "New GRP LDPC Codes for H-HARQ-IR Over the Block Fading Channel," IEEE Trans. on Commun., vol. 68, no. 11, Nov. 2020.
- [3] M.-M. Zhao, et al., "An Adaptive IR-HARQ Scheme for Polar Codes by Polarizing Matrix Extension," IEEE Commun. Lett., vol. 22, no. 7, Jul. 2018.
- [4] E. Arıkan, "Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels," IEEE Trans. on Inf. Theory, vol. 55, no. 7, Jul. 2009.
- [5] G. He, et al., "Beta-Expansion: A Theoretical Framework for Fast and Recursive Construction of Polar Codes," 2017 IEEE GLOBECOM, vol. 68, no. 11, Nov. 2017.
- [6] I. Tal, A. Vardy, "List Decoding of Polar Codes," 2011 IEEE Int. Symp. on Inf. Theory, Jul. 2011.
- [7] K. Niu, K. Chen, "CRC-Aided Decoding of Polar Codes," IEEE Commun. Lett., vol. 16, no. 10, Oct. 2012.