

5G New Radio (NR) Polar 부호의 설계 방법 소개 및 성능 평가

송 새한*, 임 승찬°, 박 현철*

Introduction to the Design Methods and Performance Evaluation of 5G New Radio (NR) Polar Codes

Sae Han Song*, Seung-Chan Lim°, Hyuncheol Park*

요 약

본 논문에서는 5G NR polar 부호의 설계 방법을 소개하고 에러 확률 성능을 평가한다. Polar 부호의 설계는 채널 분극 현상에 의하여 생성된 분극 채널의 신뢰도를 추정함으로써 정보 집합을 결정하는 문제로 정의된다. 본 논문에서는 polar 부호의 기존 설계 방법을 살펴보고, 최근 3GPP NR 표준 문서에 기술된 NR polar 부호의 설계 방법을 소개한다. NR polar 부호는 다양한 부호 파라미터에 대하여 설계가 매우 용이할 뿐만 아니라 설계 과정에서 주어진 채널 정보를 요구하지 않는다는 장점을 갖는다. 진산 실험을 통하여 NR polar 부호가 기존 기법으로 설계된 polar 부호에 근접한 성능을 가짐을 검증하였다.

Key Words : 5G channel coding, polar codes, channel polarization, code construction, performance evaluation

ABSTRACT

In this paper, we introduce the design of 5G NR polar codes and evaluate the error correcting performance. The design of polar codes is defined as the problem of determining the information set by estimating the reliabilities of polarized channels. We present the conventional design methods of polar codes, and introduce how to design 3GPP NR polar codes. The NR polar codes can be designed easily for arbitrary code parameters without any channel information. Through extensive simulations, we verify that the performances of NR polar codes are competitive with the conventional polar codes.

I. 서 론

최근 스마트폰, 태블릿 PC 등 모바일 기기의 활성화로 인해 모바일 데이터 트래픽의 수요가 폭발적

로 증가하고 있다. 이로 인해 고화질 미디어 스트리밍, 가상현실, 자율 주행, 사물 인터넷 등에 요구되는 모바일 데이터 트래픽을 기존의 통신 규격인 4G LTE (long term evolution)로는 충분히 수용할 수 없는 실

※ 이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017-0-01973, 5G초고주파 기반 고속이동체 환경에서의 채널특성 및 성능평가 국제 공동연구)

• First Author : School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, songsaehan@kaist.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-7630-8533)School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, seungchan.lim@kaist.ac.kr, 학생회원

* School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, hcpark@kaist.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201806-A-131-RE, Received May 3, 2018; Revised June 17, 2018; Accepted June 26, 2018

정이다. 현재 표준화가 활발히 진행 중인 차세대 통신 규격 5G는 이러한 한계를 극복할 것으로 기대된다.

5G 표준에는 eMBB (enhanced mobile broadband), URLLC (ultra-reliable and low latency communication), mMTC (massive machine type communication)의 세 가지 시나리오가 존재한다. eMBB 시나리오에서는 최대 1 GHz의 넓은 대역폭을 통해 최대 20 Gbps 속도로서 우리가 사용하는 스마트 기기의 통신 성능을 향상시키고 가상현실 및 증강현실 등의 서비스 지원을 목표로한다. URLLC 시나리오에서는 기지국과 단말간의 데이터 전송신시 지연시간을 1 ms 수준으로 매우 단축시키며, mMTC 시나리오에서는 적은 전력을 사용하고자 단순하고 유효 범위가 넓은 통신을 활용함으로써 사물인터넷을 지원 가능할 것으로 기대된다. 이러한 5G 시나리오들의 높은 요구 조건을 만족시키기 위하여 다양한 미래 통신 및 네트워크 기술에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 최근 eMBB 표준의 제어 채널을 지원하기 위한 채널 부호로서 polar 부호가 선정됨에 따라서 polar 부호에 대한 산학계의 활발한 연구 및 개발이 진행되어 왔다^[1].

Arikan이 제안한 polar 부호는 임의의 이진 입력 이산 무기억 채널(binary-input discrete memoryless channels)의 용량을 달성 가능함이 증명된 최초의 채널 부호이다^[2,3]. Polar 부호는 LDPC 부호나 터보 부호에 비해서 짧은 블록 길이에 대하여 우수한 정정 능력을 갖기 때문에 eMBB 제어 채널의 채널 부호로 선정되었지만 공개된 표준 문서^[1]의 사양을 반영하여 5G polar 부호의 성능을 분석한 결과는 아직 부족한 실정이다^[4].

Polar 부호는 채널분극 현상에 의하여 서로 다른 신뢰도를 가지는 분극 채널에 정보 비트를 전송하는 개념에 의하여 설계된다. 따라서 polar 부호의 설계 문제를 해결하기 위하여 분극 채널의 신뢰도를 추정하고 높은 신뢰도를 갖는 분극 채널을 선별하는 효율적인 방법에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. Arikan은 polar 부호의 설계 문제를 정의하고 점화식의 반복적인 계산을 통한 설계 기법을 제안하였다^[5]. Tanaka와 Mori는 LDPC 부호에 대하여 많은 연구가 진행되었던 밀도 진화(density evolution) 기법에 기반하여 polar 부호 설계 방법을 연구하였다^[6]. 기존 연구에서 고려한 polar 부호의 설계 방법^[5-8]은 기본적인 부호 파라미터 이외에도 주어진 채널에 대한 파라미터를 요구하여 설계를 수행하므로 상용화 표준의 채널 부호에 적용하기에는 유연하지 못하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 5G new radio (NR) 표준문서^[1]에 공개된 polar 부호의 설계 기법을 소개하고, 표준문서의 사양을 반영하여 polar 부호의 성능을 평가 및 분석한다. 5G NR polar 부호 설계 기법은 기존 기법과는 다르게 주어진 채널의 정보를 활용할 필요없이 요구되는 부호 파라미터에 따라 쉽게 설계가 가능하다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 이러한 장점을 가지는 NR polar 부호의 에러 확률 성능을 전산 실험에 기반하여 확인하고, 다양한 부호 파라미터에 대하여 기존 기법으로 설계된 polar 부호의 성능과 비교함으로써 NR polar 부호의 성능을 평가하고 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 polar 부호 및 설계 방법을 이해하기 위한 배경 지식을 소개한다. III장에서는 채널 분극 현상에 기반한 polar 부호를 정의하고 부호화 및 복호 과정을 설명한다. IV장에서는 polar 부호의 기존 설계 방법을 소개하고, V장에서는 최근 공개된 5G NR polar 부호의 설계 방법을 이해한다. VI장에서는 다양한 부호 파라미터에 대하여 수행된 시뮬레이션 결과를 통하여 NR polar 부호의 에러 확률을 평가 및 분석하고, VII장에서는 본 논문을 요약 및 정리한다.

II. 배경 지식

본 논문에서는 행 벡터 $(a_0, a_1, \dots, a_{N-1})$ 을 \mathbf{a}_0^{N-1} 으로 표기한다. 벡터 \mathbf{a}_0^{N-1} 의 부 벡터(subvector) (a_i, \dots, a_j) 는 \mathbf{a}_i^j 로 표기할 수 있다. 또한, 벡터의 요소를 표현하는 인덱스가 0을 포함한 짝수만 있는 경우, 즉 $(a_0, a_2, a_4, \dots, a_{N-1})$ 인 경우는 $\mathbf{a}_{0,e}^{N-1}$ 로 표기하고, 홀수만 있는 경우는 $\mathbf{a}_{0,o}^{N-1}$ 로 표기한다.

이진 입력 알파벳 $\mathbf{X} = \{0, 1\}$ 과 임의의 출력 알파벳 \mathbf{Y} 에 대하여 정의된 이진 입력 이산 무기억 채널 $W: \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}$ 를 고려하자. 채널 W 의 전이 확률(transition probability)은 입력 비트 $x \in \mathbf{X}$ 및 출력 심볼 $y \in \mathbf{Y}$ 에 대하여 $W(y|x)$ 으로 표기하고, 주어진 채널 W 를 N 번 독립적으로 사용하는 경우의 전이 확률은 다음과 같이 표현된다:

$$W^N(\mathbf{y}_0^{N-1} | \mathbf{x}_0^{N-1}) = \prod_{i=0}^{N-1} W(y_i | x_i) .$$

본 논문에서는 주어진 채널 W 에 대한 신뢰도를 측정하기 위하여 대칭 용량(symmetric capacity)과

Bhattacharyya 파라미터를 고려한다. 대칭 용량 $I(W)$ 는 입력이 균일한 분포를 갖는 경우에 대하여 입출력 알파벳 간의 상호 정보(mutual information)를 의미하며 다음의 식으로써 표현된다:

$$I(W) = \sum_{y \in \mathbf{Y}} \sum_{x \in \mathbf{X}} \frac{1}{2} W(y|x) \log_2 \frac{W(y|x)}{\frac{1}{2} W(y|0) + \frac{1}{2} W(y|1)}.$$

대칭 용량은 신뢰도 높은 통신이 가능한 최대 전송량을 의미하며, 그 값이 1에 가까울수록 주어진 채널의 신뢰도가 높으며 반대로 0에 가까울수록 채널의 신뢰도가 낮음을 의미한다. Bhattacharyya 파라미터는 채널 W 로 전송된 비트를 최대 우도 검출(maximum likelihood detection)을 이용하여 복호할 경우의 에러 확률에 대한 상한 값을 의미하며 다음의 식으로 정의된다:

$$\mathcal{Z}(W) = \sum_{y \in \mathbf{Y}} \sqrt{W(y|0)W(y|1)}.$$

Bhattacharyya 파라미터는 0과 1 사이의 값을 가지는데, 그 값이 클수록 주어진 채널의 신뢰도가 낮다고 판단되며 반대로 파라미터의 값이 작을수록 주어진 채널의 신뢰도가 높음을 의미한다.

III. 채널 분극 현상 및 Polar 부호

3.1 채널 분극 현상

이진 입력 이산 무기억 채널 W 를 독립적으로 $N=2^n$ 번 사용할 때, 채널 결합 및 채널 분리 과정을 통하여 신뢰도가 상이한 N 개의 분극화된 채널의 집합을 생성할 수 있다^[2]. 채널 결합을 통하여 생성되는 벡터 채널 $W_N: \mathbf{X}^N \rightarrow \mathbf{Y}^N$ 의 전이 확률은 다음과 같이 표현된다:

$$W_N(\mathbf{y}_0^{N-1} | \mathbf{u}_0^{N-1}) = W^N(\mathbf{y}_0^{N-1} | \mathbf{u}_0^{N-1} \mathbf{G}_N).$$

여기서 \mathbf{G}_N 은 채널 분극 현상을 발생시키는 분극 행렬(polarizing matrix)이고, Kronecker power 연산을 이용하여 $\mathbf{G}_N = (\mathbf{G}_2)^{\otimes n}$, $\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 의 식으로써 계산된다. 결합된 벡터 채널에 대하여 채널 분리 과정을 적용하면 다음의 전이 확률을 갖는 N 개의 분극 채널

$W_N^{(i)}: \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}^N \times \mathbf{X}^{i-1}$, $0 \leq i \leq N-1$ 을 생성할 수 있다:

$$W_N^{(i)}(\mathbf{y}_0^{N-1}, \mathbf{u}_0^{i-1} | u_i) = \sum_{\mathbf{u}_{i+1}^{N-1}} \frac{1}{2^{N-1}} W_N(\mathbf{y}_0^{N-1} | \mathbf{u}_0^{N-1}).$$

만약 N 이 매우 커진다면 $N(1-I(W))$ 개의 분극 채널의 상호 정보는 0으로 수렴하고, $NI(W)$ 개의 상호 정보 값이 1로 수렴하는데 이러한 현상을 채널 분극 현상이라고 한다^[2,3].

3.2 Polar 부호

채널 분극 현상을 통하여 생성된 분극 채널의 집합 $\{W_N^{(i)}: 0 \leq i \leq N-1\}$ 을 고려하자. 총 N 개의 분극 채널 중 상호 정보가 1인 $NI(W)$ 개의 분극 채널을 통하여 정보 비트를 전송하고, 나머지 $N(1-I(W))$ 개의 분극 채널을 통하여 임의의 비트를 전송한다면, 주어진 채널 W 의 채널 용량 $I(W)$ 를 달성하는 polar 부호를 설계할 수 있다^[2]. 이 때, 신뢰도가 낮은 분극 채널로 전송되는 비트를 동결 비트(frozen bits)라고 정의하며, 일반적으로 모든 값을 0으로 설정 가능하다.

만약 유한한 값의 N 을 고려한다면, 이상적인 채널 분극 현상이 발생함을 보장할 수 없다. 이 경우 부호율 R 에 대하여 상대적으로 높은 신뢰도를 갖는 $K=NR$ 개의 분극 채널을 통하여 정보 비트를 전송하고, 나머지 $(N-K)$ 개의 분극 채널을 통하여 동결 비트를 전송하여 (N, K) polar 부호를 설계 가능하다. 생성된 분극 채널의 집합 중 상대적으로 높은 신뢰도를 갖는 분극 채널의 인덱스 집합을 Q_I 로 표현하고, 낮은 신뢰도를 갖는 분극 채널의 인덱스 집합을 Q_F 라고 표현하자. Polar 부호의 정보어를 $\mathbf{u}_0^{N-1} = [\mathbf{u}_{Q_F}, \mathbf{u}_{Q_I}]$ 와 같이 구성한다면, 분극행렬 \mathbf{G}_N 에 기반하여 부호어 $\mathbf{x}_0^{N-1} = \mathbf{u}_0^{N-1} \mathbf{G}_N$ 을 부호화할 수 있다.

부호어 \mathbf{x}_0^{N-1} 를 주어진 채널을 통하여 전송했을 때 수신된 벡터를 \mathbf{y}_0^{N-1} 으로 표기하자. Polar 부호에 대하여 순차적 제거(successive cancellation, SC) 복호를 적용한다면, $0 \leq i \leq N-1$ 번째 정보 비트에 대한 추정 값을 다음의 식으로 표현 할 수 있다:

$$\hat{u}_i = \begin{cases} 0, & i \in Q_F, \\ d_i(\mathbf{y}_0^{N-1}, \hat{\mathbf{u}}_0^{i-1}), & i \in Q_I, \end{cases}$$

여기서 $d_i: \mathbf{Y}^N \times \mathbf{X}^{i-1} \rightarrow \mathbf{X}$ 는 정보 비트의 추정 값을 결정하는 함수로서

$$d_i(\mathbf{y}_0^{N-1}, \hat{\mathbf{u}}_0^{i-1}) = \begin{cases} 0, & \text{if } L_N^{(i)}(\mathbf{y}_0^{N-1}, \hat{\mathbf{u}}_0^{i-1}) \geq 0, \\ 1, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

으로 표현되며, $L_N^{(i)}(\mathbf{y}_0^{N-1}, \hat{\mathbf{u}}_0^{i-1})$ 는 i 번째 분극 채널의 전이 확률의 비를 통하여 정의되는 로그-우도 비율(log-likelihood ratio, LLR)을 의미한다. Polar 부호의 구조적 특징을 이용하면 각 분극 채널의 LLR을 본 페이지의 하단에 있는 (식 1)을 통하여 반복적으로 계산이 가능하다. (식 1a)와 (식 1b)는 SC 복호 그래프를 구성하는 체크 노드(check node) 및 변수 노드(variable node)에서의 LLR 업데이트 연산을 각각 의미한다.

Polar 부호의 SC 복호 기법은 i 번째 분극 채널의 입력 정보 비트에 대한 추정 값을 즉시 결정하는 방법이다. 따라서 만약 추정 값에 오류가 발생한다면 에러가 $j > i$ 번째 정보 비트 추정에 영향을 줄 수 있다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 제안된 순차적 제거 리스트(successive cancellation list decoding, SCL) 복호 기법은 i 번째 정보 비트를 복호할 때 추정 값 \hat{u}_i 이 0과 1인 경우를 모두 고려하기 위하여 진행 중인 복호 경로를 분리하고 각 경로에 대응되는 경로 메트릭(path metric)을 다음의 식으로 계산한다^{9,10}:

$$PM_l^{(i)} = \sum_{j=0}^i \ln \left(1 + e^{- (1 - 2\hat{u}_j[l]) L_m^{(j)}[l]} \right).$$

여기서 $1 \leq l \leq L$ 은 복호 경로의 리스트에 대한 인덱스를 의미하며 L 은 리스트 복호 기법의 최대 경로 수를 의미한다. 리스트 복호 과정에서 경로 분리 시 복호 경로의 수가 항상 2배 씩 증가하므로 만약 생존 복호 경로의 수가 L 을 초과하는 경우에는 L 개의 최대 경로 메트릭을 가지는 복호 경로만을 선별한다. 만약 모든 정보 비트에 대한 복호 경로가 수립된다면 최대 경로 메트릭을 가진 복호 경로에 대응되는 K 개의

정보 비트를 리스트 복호 기법의 추정 값으로서 결정한다.

SCL 복호 기법의 성능 개선을 위하여 polar 부호와 순환 중복 검사(cyclic redundancy check, CRC) 부호의 연접을 고려하고 순환 중복 검사 보조 리스트(CRC-aided SCL, CA-SCL) 복호 기법을 적용할 수 있다⁹. 연접 부호의 부호화 과정에서는 K 개의 정보 비트 뒤에 r 개 CRC 비트를 추가한 후 $(N, K+r)$ polar 부호의 부호화를 수행한다. CA-SCL 복호 과정에서는 SCL 복호 과정을 동일하게 수행하되 최종 수립된 L 개의 복호 경로에 대한 추정 값에 CRC 검사를 수행한다. CRC 검사를 통해 유효한 부호어에 대응하는 복호 경로 중 최대의 경로 메트릭을 가지는 복호 경로에 대응되는 K 개의 정보 비트를 추정 값으로 결정한다.

IV. Polar 부호의 기존 설계 방법

본 논문의 III. 2 절에 정의된 polar 부호를 설계하기 위해서는 채널 분극 현상으로 생성되는 분극 채널의 신뢰도를 추정해야 한다. 하지만 일반적인 블록 길이 N 을 고려할 때, 분극 채널의 상호 정보 또는 Bhattacharyya 파라미터의 정확한 계산 및 평가는 매우 높은 연산 복잡도를 요구하므로, 실용적인 방법을 통하여 우수한 성능을 갖는 polar 부호 설계 기법들이 기존에 연구 되었다⁵⁻⁸.

Polar 부호의 설계는 블록 에러 확률을 최소화하는 정보 집합을 결정하는 문제로써 정의될 수 있다². SC 복호 기법을 적용하는 경우에 대하여 i 번째 비트에서 처음 에러가 발생할 사건 B_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$B_i = \{ \hat{\mathbf{u}}_0^{i-1} = \mathbf{u}_0^{i-1}, \hat{u}_i \neq u_i \}.$$

또한, i 번째 비트의 추정 값에 에러가 발생할 사건을 $A_i = \{ \hat{u}_i \neq u_i \}$ 로 정의한다면, 정의된 두 사건에 대하여 $B_i \subseteq A_i$ 의 관계가 성립함을 알 수 있다. 따라서, polar 부호의 블록 에러 사건 E 에 대하여 정의되는 블록 에러 확률 $P(E)$ 는 다음의 관계식으로 표현된다^{2,11}:

$$L_N^{(2i)}(\mathbf{y}_0^{N-1}, \hat{\mathbf{u}}_0^{2i-1}) = 2 \tanh^{-1} \left(\tanh \left(L_{N/2}^{(i)}(\mathbf{y}_0^{N/2-1}, \hat{\mathbf{u}}_{0,e}^{2i-1} \oplus \hat{\mathbf{u}}_{0,o}^{2i-1}) / 2 \right) \tanh \left(L_{N/2}^{(i)}(\mathbf{y}_0^{N/2}, \hat{\mathbf{u}}_{0,e}^{2i-1}) / 2 \right) \right) \quad (1a)$$

$$L_N^{(2i+1)}(\mathbf{y}_0^{N-1}, \hat{\mathbf{u}}_0^{2i}) = L_{N/2}^{(i)}(\mathbf{y}_0^{N/2}, \hat{\mathbf{u}}_{0,e}^{2i-1}) + (-1)^{\hat{u}_{2i}} L_{N/2}^{(i)}(\mathbf{y}_0^{N/2-1}, \hat{\mathbf{u}}_{0,e}^{2i-1} \oplus \hat{\mathbf{u}}_{0,o}^{2i-1}). \quad (1b)$$

$$P(E) = \sum_{i \in Q_L} P(B_i) \leq \sum_{i \in Q_L} P(A_i) \leq \frac{1}{2} \sum_{i \in Q_L} Z_N^{(i)}. \quad (2)$$

본 장에서는 유한한 블록 길이의 polar 부호를 설계하기 위하여 기존 연구에서 고려되었던 분극 채널의 신뢰도 추정 기법을 소개한다. 추정 기법에 기반하여 모든 분극 채널의 신뢰도를 계산하면 높은 신뢰도를 갖는 K 개의 분극 채널의 인덱스를 정보 집합 Q_p , 나머지 $(N-K)$ 개의 분극 채널의 인덱스를 동결 집합 Q_f 로 분류함으로써 polar 부호를 설계할 수 있다.

4.1 Arikan의 polar 부호 설계 기법

(식 2)를 통하여 Bhattacharyya 파라미터의 합이 polar 부호의 블록 에러 확률에 대하여 상한임을 알 수 있다. 따라서 우수한 블록 에러 확률을 갖는 polar 부호를 설계하기 위하여 상한 값인 Bhattacharyya 파라미터의 합을 최소화 시키는 정보 집합을 선택하는 기법을 고려할 수 있다. 분극 채널에 대한 Bhattacharyya 파라미터의 계산은 다음의 점화식에 기반하여 수행될 수 있다^{2,5}.

$$Z(W_{2N}^{(2i)}) \leq 2Z(W_N^{(i)}) - Z(W_N^{(i)})^2, \quad (3a)$$

$$Z(W_{2N}^{(2i+1)}) = Z(W_N^{(i)})^2. \quad (3b)$$

(식 3a)에서 등호는 주어진 채널이 이진 소실 채널(binary erasure channel)인 경우에 대하여 성립되며, 블록 길이 N 이 1인 경우의 초기 값은 주어진 채널의 Bhattacharyya 파라미터 값인 $Z(W)$ 로써 설정된다. 하지만, 일반적인 이진 입력 이산 무기억 채널에 대해서는 (식 3a)가 등호로써 성립하지 않기 때문에 (식 3)을 이용하면 각 분극 채널의 Bhattacharyya 파라미터를 정확히 계산할 수 없다.

Arikan은 주어진 채널이 소실 확률이 0.5인 이진 소실 채널임을 가정하고 (식 3)의 점화식에 기반하여 분극 채널의 Bhattacharyya 파라미터를 반복적으로 추정하는 기법을 제안하였다⁵. (식 3)의 점화식을 통하여 총 N 개의 Bhattacharyya 파라미터를 추정하면, 가장 낮은 추정 값을 갖는 K 개의 분극 채널의 인덱스를 정보 집합 Q_p 에 포함시키고, 상대적으로 높은 추정 값을 갖는 $(N-K)$ 개의 분극 채널의 인덱스를 동결 집합 Q_f 의 원소로 설정함으로써 polar 부호를 설계할 수 있다. Arikan의 설계 기법은 매우 간단한 분극 채널의 신뢰도를 계산 가능하지만 이진 소실 채널

이 아닌 경우에 대하여 최적의 정보 집합을 선택할 수 없기 때문에 설계된 polar 부호의 성능이 열화될 수 있다.

4.2 밀도 진화에 기반한 polar 부호 설계 기법

밀도 진화를 이용한 부호 설계 기법에서는 (식 2)의 관계식에서 i 번째 비트의 추정 값에 에러가 발생할 확률 $P(A_i)$ 를 추정한다. 따라서 밀도 진화 기법에 기반하여 설계된 polar 부호는 일반적으로 Arikan의 기법으로 설계된 polar 부호보다 우수한 성능을 가질 수 있다.

Polar 부호의 밀도 진화 기법은 복호 과정에 사용되는 LLR을 랜덤 변수로 해석하고 각 노드 연산에 대한 LLR의 확률 밀도 함수(probability density function)의 진화 과정을 추적한다. 주어진 이진 입력 이산 무기억 채널 W 에 대한 LLR의 확률 밀도 함수를 a_W 라고 표기할 때, 체크 노드 및 변수 노드에서 수행되는 LLR의 확률 밀도 함수의 진화 과정은 다음의 관계식으로 각각 표현된다⁶.

$$a_{2N}^{2i} = a_N^i \boxtimes a_N^i, \quad (4a)$$

$$a_{2N}^{2i+1} = a_N^i \star a_N^i. \quad (4b)$$

여기서 \boxtimes 와 \star 는 각각 체크 노드와 변수 노드에서 수행되는 확률 밀도함수에 대한 콘볼루션 연산을 의미하며¹², 밀도 진화 기법의 초기 값은 $a_1^i = a_W$ 로써 설정된다. (식 4)의 점화식을 반복적으로 적용하면 각 분극 채널에 대하여 LLR의 확률 밀도 함수를 계산할 수 있다. 밀도 진화 과정을 통해 LLR의 확률 밀도 함수를 계산한다면 다음의 식을 통하여 에러 확률 $P(A_i)$ 을 구할 수 있다.

$$P(A_i) = \lim_{\epsilon \rightarrow +0} \left(\int_{-\infty}^{-\epsilon} a_N^i(x) dx + \frac{1}{2} \int_{-\epsilon}^{+\epsilon} a_N^i(x) dx \right). \quad (5)$$

모든 $1 \leq i \leq N$ 에 대하여 (식 5)의 에러 확률을 계산하면, 정보 집합 Q_p 에 가장 낮은 확률 값을 갖는 K 개의 인덱스를 포함시키고, 동결 집합 Q_f 에 높은 확률 값을 갖는 $(N-K)$ 개의 인덱스를 포함시킴으로써 polar 부호를 설계한다. 밀도 진화 기법은 Arikan의 방법보다 상대적으로 높은 연산 복잡도를 요구하지만 실제 블록 에러 확률에 근접한 상한 값을 추정하

기 때문에 더 우수한 성능을 가지는 polar 부호를 설계 가능하다.

V. 5G NR polar 부호의 설계 방법

5G NR 표준 규격에서 지원하는 polar 부호의 최대 블록 길이 N_{\max} 는 1024로써 정의된다. 최대 블록 길이 N_{\max} 에 대하여 NR polar 수열의 각 요소를 가리키는 인덱스 $0 \leq i \leq N_{\max} - 1$ 를 고려하고 각 분극 채널을 가리키는 인덱스를 $0 \leq Q_i^{N_{\max}} \leq N_{\max} - 1$ 로써 표기하자. 이 때, NR polar 수열 $Q_0^{N_{\max}-1} = [Q_0^{N_{\max}}, Q_1^{N_{\max}}, \dots, Q_{N_{\max}-1}^{N_{\max}}]$ 은 다음의 규칙에 의하여 구성되어 있다^[1]:

$$W(Q_0^{N_{\max}}) \leq W(Q_1^{N_{\max}}) \leq \dots \leq W(Q_{N_{\max}-1}^{N_{\max}}).$$

여기서 $W(Q_i^{N_{\max}})$ 는 $Q_i^{N_{\max}}$ 번째 분극 채널의 신뢰도를 의미하기 때문에 NR polar 수열은 분극 채널의 인덱스가 신뢰도 관점에서 오름차순으로 정렬되어 있다. 따라서 수열의 인덱스가 작으면 대응되는 분극 채널의 신뢰도가 낮고 인덱스가 크면 대응되는 분극 채널의 신뢰도가 높다는 사실을 알 수 있다. 표 1은 5G NR 표준 문서에 기술된 NR polar 수열을 보여준다. 표 1의 정보를 활용하면 126 번째로 신뢰도가 낮은 채널의 인덱스는 768이라는 사실을 알 수 있다. 또한, 가장 신뢰도가 낮은 분극 채널의 인덱스는 0이고, 가장 신뢰도가 높은 분극 채널의 인덱스는 1023로 규정되어 있다.

표 1의 NR polar 수열을 이용하여 임의의 블록 길이 $N \leq N_{\max}$ 을 가지는 수열을 구성하는 방법은 다음과 같다. 블록 길이 N_{\max} 에 대하여 정의된 NR polar

수열 $Q_0^{N_{\max}-1}$ 의 부분 수열로서 길이가 $N \leq N_{\max}$ 인 수열을 $Q_0^{N-1} = [Q_0^N, Q_1^N, \dots, Q_{N-1}^N]$ 라고 정의한다. 부분 수열 Q_0^{N-1} 의 모든 요소는 N 보다 작은 값으로 구성되어 있으며 다음의 조건으로 정렬된다.

$$W(Q_0^N) \leq W(Q_1^N) \leq \dots \leq W(Q_{N-1}^N).$$

임의의 블록 길이 N 에 대하여 polar 수열을 결정하면, 각 인덱스가 나타내는 채널의 신뢰도가 오름차순으로 정렬되어 있으므로 다음과 같이 정보 집합 및 동결 집합을 각각 결정할 수 있다.

$$Q_I = \{Q_{N-K}^N, \dots, Q_{N-1}^N\},$$

$$Q_F = \{Q_0^N, \dots, Q_{N-K-1}^N\}.$$

5G NR polar 부호는 블록 길이가 주어지면 표준에 명시된 polar 수열을 이용하여 쉽게 설계가 가능하다는 특징을 가진다. 또한, 기존 설계 기법에서는 (식 3)과 (식 4)의 점화식을 계산하는 과정에서 주어진 채널의 정보를 반영한 초기 값 설정이 요구되었던 반면, 5G NR polar 부호의 설계 과정에서는 기본적인 부호 파라미터 이외의 정보를 전혀 요구하지 않으므로 임의의 채널에 대하여 유연한 부호 설계가 가능하다.

VI. 모의 실험

본 장에서는 모의 실험을 통하여 5G NR polar 부호의 성능을 평가하고 분석한다. Polar 부호의 성능 지표로써 비트 에러 확률(bit error rate, BER)을 고려한다. 수행된 시뮬레이션에서는 부호어가 BPSK(binary phase shift keying) 변조되어 AWGN

표 1. 5G polar 수열 $Q_0^{N_{\max}-1}$ 및 신뢰도 $\{W(Q_i^{N_{\max}})\}_{i=1}^{N_{\max}}$ [2].

Table 1. 5G polar sequence $Q_0^{N_{\max}-1}$ and reliability $\{W(Q_i^{N_{\max}})\}_{i=1}^{N_{\max}}$ [2].

$W(Q_i^{N_{\max}})$	$Q_i^{N_{\max}}$	$W(Q_i^{N_{\max}})$	$Q_i^{N_{\max}}$...	$W(Q_i^{N_{\max}})$	$Q_i^{N_{\max}}$	$W(Q_i^{N_{\max}})$	$Q_i^{N_{\max}}$
0	0	128	518	...	768	819	896	966
1	1	129	54	...	769	814	897	755
2	2	130	83	...	770	439	898	859
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
125	768	253	209	...	893	506	1021	1021
126	268	254	284	...	894	749	1022	1022
127	274	255	648	...	895	945	1023	1023

(additive white Gaussian noise) 채널을 통해 전송되는 환경을 가정하였고, 수신단에서는 최대 리스트 크기 8을 가지는 CA-SCL 복호 기법을 적용하였다. CA-SCL 복호 기법이 적용되는 연결 부호를 고려하는 경우 NR 규격에 정의된 다음의 CRC 다항식을 이용하여 24 개의 CRC 비트를 추가하였다¹⁾:

$$\begin{aligned}
 CRC_{24C}(D) = & D^{24} + D^{23} + D^{21} + D^{20} + D^{17} \\
 & + D^{15} + D^{13} + D^{12} + D^8 + D^4 \\
 & + D^2 + D + 1.
 \end{aligned}$$

5G NR polar 부호(5G NR)의 비교 대상으로써 III 장에 소개된 Arikan의 부호 설계 방법(BEC Approx.) 및 밀도 진화 기반 설계 기법(DE)를 고려하였다. 다양한 설계 기법에 대한 BER의 비교 및 평가를 위하여 polar 부호의 부호율은 1/4, 1/2, 3/4을 고려하였고, 각 부호율에 대하여 블록 길이를 256, 512, 1024으로 설정하였다. Arikan의 부호 설계 방법을 적용하는 경우 점화식의 초기 값은 0.5임을 가정하였고, 밀도 진화 기법을 적용하는 경우에는 각 동작 비트 에너지 대 잡음 비 (E_b/N_0) 별로 최적의 정보 집합 및 동결집합을 설계하였다.

그림 1-3은 각각 부호율 1/4, 1/2, 3/4에 대하여 다양한 방법으로 설계된 polar 부호의 BER을 비교하여 보여준다. 다양한 실험 파라미터에 대한 실험 결과로부터 NR polar 부호가 Arikan 부호 설계 기법보다는 우수한 성능을 가지며 밀도 진화 기법으로 설계된

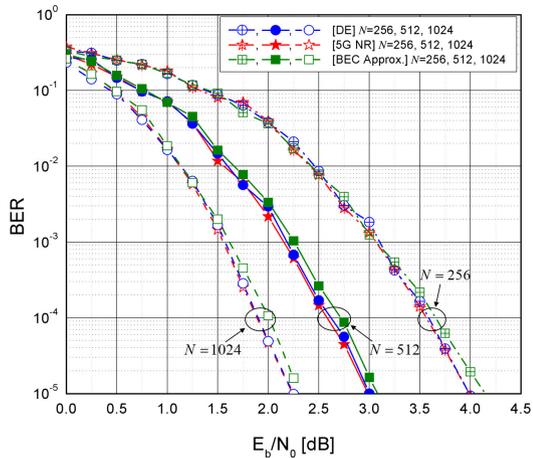


그림 1. 설계 방법에 따른 polar 부호의 BER 비교 ($R=1/4$).
Fig. 1. BERs of polar codes designed by different methods ($R=1/4$).

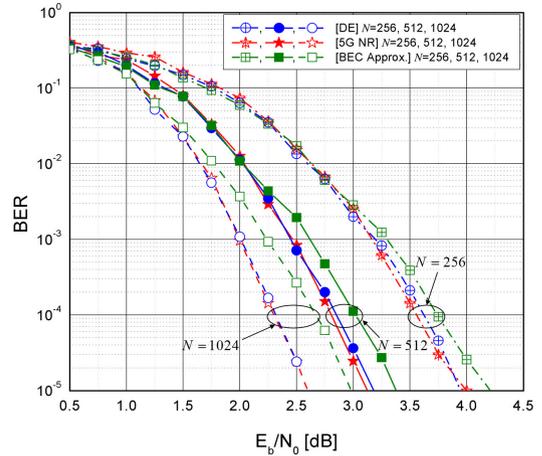


그림 2. 설계 방법에 따른 polar 부호의 BER 비교 ($R=1/2$).
Fig. 2. BERs of polar codes designed by different methods ($R=1/2$).

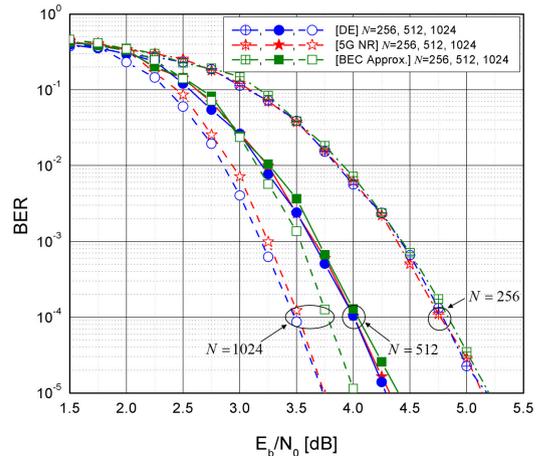


그림 3. 설계 방법에 따른 polar 부호의 BER 비교 ($R=3/4$).
Fig. 3. BERs of polar codes designed by different methods ($R=3/4$).

polar 부호에 준하는 BER 성능을 달성 가능한 사실을 알 수 있다. Arikan의 기법으로 설계된 polar 부호는 실제 분극 채널의 신뢰도를 충분히 반영하여 정보 집합을 선택할 수 없기 때문에 나머지 기법 대비 성능이 열화된다. 3GPP 표준화 회의에서는 CA-SCL 복호 기법 적용 시 우수한 정정 능력을 가지는 요구 조건을 만족시키는 관점에서 V 장에 기술된 NR polar 수열을 결정하였다¹⁾. 그림 1-3의 결과는 이러한 방식에 기반하여 설계된 NR polar 부호가 최대 리스트 크기가 8인 CA-SCL 기법을 적용하였을 때 실제로 우수한

BER 성능을 갖는다는 사실을 보여준다. 반면, 5G NR polar 부호의 설계 방법은 주어진 채널 파라미터를 요구하지 않으면서도 표 1에 제시된 polar 수열에 기반하여 임의의 부호 파라미터에 대하여 쉽게 설계가 가능한 장점을 확인할 수 있다.

VII. 결 론

최근 5G 물리계층 표준 채널 부호로서 polar 부호가 채택되면서 polar 부호 관련 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 채널 분극 현상에 의하여 생성된 분극 채널의 신뢰도를 추정하고 높은 신뢰도를 가지는 분극 채널을 선별하는 관점에서의 polar 부호의 설계와 관련하여 활발한 연구 및 개발이 진행되어 왔다. 기존 설계 기법에서는 주어진 이진 입력 이산 무 기억 채널의 정보 및 부호 파라미터를 반영하여 polar 부호의 블록 에러 확률을 낮출 수 있는 정보 집합 및 동결 집합을 결정하였다. 반면 최근 공개된 5G eMBB 표준에서는 명시된 polar 수열에 기반하여 임의의 부호 파라미터를 가지는 polar 부호의 설계 방법을 제시하고 있다. 본 논문에서는 5G NR polar 부호의 설계 방법을 소개하고 전산 실험을 통하여 에러 확률 성능을 분석하였다. 5G NR polar 부호는 다양한 부호 파라미터에 대한 설계가 매우 용이할 뿐만 아니라 기존 기법으로 설계한 polar 부호와 비교해도 우수한 성능을 달성함을 검증하였다.

References

[1] 3GPP TS 38.212 v15.0.1 (2018-03): *3rd Generation Partnership Project; Technical specification group radio access network; NR; Multiplexing and channel coding* (Release 15).

[2] E. Arikan, "Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051-3073, Jul. 2009.

[3] E. Arikan, "Channel combining and splitting for cutoff rate improvement," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 628-639, Feb. 2006.

[4] S. Song, S.-C. Lim, and H. Park, "Performance evaluation of 5G new radio (NR) polar codes," in *Proc. Symp. Korean*

Inst. Commun. Inf. Sci., pp. 225-226, Nov. 2017.

[5] E. Arikan, "A performance comparison of polar codes and Reed-Muller codes," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 6, pp. 447-449, Jun. 2008.

[6] R. Mori and T. Tanaka, "Performance of polar codes with the construction using density evolution," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, pp. 519-521, Jul. 2009.

[7] I. Tal and A. Vardy, "How to construct polar codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 59, no. 10, pp. 6562-6582, Oct. 2013.

[8] P. Trifonov, "Efficient design and decoding of polar codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 11, pp. 3221-3227, Nov. 2012.

[9] I. Tal and A. Vardy, "List decoding of polar codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2213-2226, May 2015.

[10] A. Balatsoukas-Stimming, M. B. Parizi, and A. Burg, "LLR-based successive cancellation list decoding of polar codes," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 63, no. 19, pp. 5165-5179, Oct. 2015.

[11] M. Griot, "A tighter Bhattacharyya bound for decoding error probability," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 11, no.4, Apr. 2007.

[12] T. Richardson and R. Urbanke, *Modern Coding Theory*, Cambridge University Press, 2008.

송 새 한 (Sae Han Song)



2017년 2월 : 부산대학교 전자공학과 졸업
 2017년 3월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사과정
 <관심분야> 다중 안테나, 채널 부호

임 승 찬 (Seung-Chan Lim)



2011년 2월 : 홍익대학교 전자
전기공학과 학사
2013년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 석사
2015년 3월~현재 : 한국과학기술
술원 전기 및 전자공학부
박사과정

<관심분야> 다중 접속, 다중 안테나, 채널부호

박 현 철 (Hyuncheol Park)



1983년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 학사
1985년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 석사
1997년 8월 : Georgia Institute
of Technology Electrical
Eng. 박사

1984년 12월~2002년 1월 : 삼성전자 수석연구원
2002년 2월~2009년 2월 : 한국정보통신대학교(ICU)
부교수
2014년 11월~2016년 11월 : 미래창조과학부 이동통
신 CP
2009년 3월~현재 : 한국과학기술원 정교수
<관심분야> 이동통신 시스템