

비이진 극 부호를 위한 새로운 고정 심볼 선택 방법

New Frozen Symbols Selection Method for Non-Binary Polar Codes

변성철 · 노재현 · 김동호 · 강현진

Sung Chul Byun · Jaehyun Ro · Dongho-Kim · Hyun-jin Kang

요 약

Arikan에 의해 제안된 이진 극 부호는 이진 입력 이산 무기억 채널에서 채널 용량을 달성할 수 있는 최초의 부호이다. 그러나 이진 극 부호는 비교적 부호 및 복호 지연이 높은 단점을 갖는다. 이를 위한 해결 방안 중 하나로 비이진 극 부호에 대한 연구가 수행되어 왔다. 다만, 비이진 극 부호를 구성하기 위한 고정 심볼 선택 방법에 대한 연구는 현재 다소 미미하다. 본 논문에서는 비이진 극 부호를 구성하기 위한 블록 오류율 방정식을 기반으로 한 새로운 고정 심볼 선택 방법을 제안한다. 이는 극 부호를 구성하는 일반적인 2×2 커널 외, 멀티 커널에도 적용이 가능하다는 이점이 있다. 또한 본 논문에서는 제안된 고정 심볼 선택 방법을 기반으로 구성된 비이진 극 부호의 블록 오류율 성능을 확인하고 분석한다.

Abstract

Binary polar codes proposed by Arikan are the first error correcting codes that can achieve channel capacity in binary input discrete memoryless channels. However, the binary polar codes has a disadvantage in that the encoding and decoding latency are relatively high. Therefore, research has been conducted on non-binary polar codes to determine a solution for this. However, research on frozen symbols selection methods for constructing non-binary polar codes is currently rather insignificant. In this study, we propose a new frozen symbols selection method based on the block error rate equation for constructing non-binary polar codes. This has the advantage that it can be applied to multi-kernels as well as the general 2×2 kernels constituting non-binary polar codes. In addition, in this study, we verify and analyze the block error rate performance of non-binary polar codes constructed based on the proposed frozen symbols selection method.

Key words: Non-Binary Polar Codes, Frozen Symbols Selection, Block Error Rate

I. 서 론

Arikan에 의해 제안된 이진 극 부호(binary polar code)는 이진 입력 이산 무기억 채널(binary input discrete memoryless channel, BI-DMC)에서 채널 용량을 달성할 수

있는 최초의 부호이다^[1]. 극 부호는 5G NR(new radio)의 제어 채널에서 표준 코드로 채택되었으며^[2], URLLC (ultra-reliable low-latency communication) 시나리오를 위한 채널 부호로 주목받고 있다. URLLC는 저지연을 요구하지만 이진 극 부호는 우수한 오류 정정 능력을 위해 복잡

LIG넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received August 14, 2023 ; Revised September 14, 2023 ; Accepted October 16, 2023. (ID No. 20230814-061)

· Corresponding Author: Sung Chul Byun (e-mail: sungchul.byun@lignex1.com)

도 및 복호 지연이 높은 복호 방법을 사용한다^[3]. 이러한 문제를 해결하기 위해, 병렬 처리 방식을 복호기에 적용함으로써 복호 지연을 감소시키기 위한 여러 연구가 수행되어왔다^{[4],[5]}. 비이진 극 부호는 이진 극 부호에 비해 블록 오류율을 줄이는 이점이 있다^[6]. Arikan에 의해 제안된 이진 극 부호의 경우에 부호어의 길이는 대부분 2의 거듭제곱으로 국한되지만, 비이진 극 부호는 부호어의 길이를 보다 다양하게 구성할 수 있다는 이점이 있다.

채널 양자화 현상을 이용하는 극 부호는 고정 심볼의 위치를 선택하는 것이 매우 중요하다. 그러나 이진 극 부호와 달리, 비이진 극 부호의 고정 심볼 선택 방법은 잘 알려져 있지 않다. 본 논문에서는 비이진 극 부호의 새로운 고정 심볼 선택 방법을 제안한다.

이진 극 부호를 구성하기 위해, 이진 소거 채널(binary erasure channel, BEC)에서 Bhattacharyya 파라미터를 통해 각 분리 채널들에 대한 채널 용량을 정확히 추정하는 것이 가능하다는 것은 이미 잘 알려져 있는 사실이다. 그러나 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN) 채널과 같은 유·무한 크기의 알파벳 채널들을 포함한 광범위한 범위의 채널의 경우, 각 분리 채널들에 대한 채널 용량을 정확히 추정하는 것은 매우 어렵기 때문에, 여러 가지 근사적 부호 구성 방법이 제안되었다^{[1],[7],[8]}. Arikan은 Bhattacharyya 파라미터의 추정을 기반으로 한 근사적 부호 구성 방법을 제안하였다^[1]. 블록 오류 확률 $P(\epsilon)$ 은 모든 정보 비트에 대한 Bhattacharyya 파라미터 $Z(W_N^{(i)})$, $i=1,2, \dots, N$ 의 합인 $\sum_{i \in A} Z(W_N^{(i)})$, $A \subseteq 1,2, \dots, N$ 을 상계(upper bound)값으로 갖는다. 여기서, BLER(block error rate) 방정식을 통해 이는 비교적 더 정확하게 표현이 가능하다^[9]. 본 논문에서는 이진 극 부호를 구성하는 경우와 유사하게, 비이진 극 부호의 구성을 위해 BLER 방정식을 기반으로 새로운 고정 심볼 선택 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 방법은 극 부호를 구성하는 일반적인 2×2 커널 외, 멀티 커널을 구성하는 극 부호에 대해서도 쉽게 적용이 가능하다는 이점이 있다.

본 논문의 II장에서는 비이진 극 부호의 채널 분리 및 합성에 대해 설명하고 III장에서는 BLER 방정식을 기반으로 한 고정 심볼 선택 방법을 제안한다. IV장에서는 III

장에서 제안한 고정 심볼 선택 방법을 기반으로 구성된 비이진 극 부호의 BLER 성능을 확인하고 이에 대해 분석하며 마지막으로 V장에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

II. 채널 양극화

2-1 표기법

본 장에서 채널 $W: X \rightarrow Y$ 는 이산 무기억 채널(discrete memoryless channel, DMC)이라 가정한다. 여기서 입력 알파벳 X 의 크기는 q 이며 출력 알파벳 Y 는 임의의 유한한 크기를 갖는다. 부호어의 길이는 N 으로 나타내며 A 는 임의의 비이진 극 부호의 길이 N 에서 고정 심볼의 집합을 의미하고 고정 심볼 집합의 크기는 $N-K$ 이다. R 은 K/N 인 부호화율을 의미한다. 또한 벡터들의 시작점과 끝점은 아래첨자와 위첨자로 나타낸다. 예를 들어, 벡터 (u_1, u_2, \dots, u_N) 은 간단히 u_1^N 으로 표현되며 벡터 u_1^N 의 원소 중 a 번째의 원소부터 b 번째의 원소 $(u_a, u_{a+1}, \dots, u_b)$ 에 대해서는 u_a^b 로 표현한다.

2-2 채널 합성 및 분리

극 부호는 N 개의 독립적인 BI-DMC(binary-discrete memoryless channel) 채널이 합성과 분리 과정을 통해 N 이 증가할수록 채널 용량이 0 또는 1로 양극화되는 채널 양극화 현상을 이용하여 채널 용량을 달성하는 부호이다.

비이진 채널의 채널 합성은 이진 채널과 유사한 방식으로 이루어진다. 채널 합성은 독립적인 N 개의 이산 무기억 채널 W 를 재귀적으로 합성하여 길이 N 의 합성 채널로 만드는 과정이다. 기존의 비이진 극 부호는 두 개의 독립적인 채널이 재귀적으로 합성해나가기에 길이 N 은 2^r 꼴이 된다. 여기서 r 은 임의의 정수이다.

채널 합성 과정을 살펴보면 가장 먼저 두 개의 독립적인 채널 W 를 합성하여 채널 W_2 가 만들어진다. 이때, 채널 W_2 에 대한 천이 확률 $W_2(y_1, y_2 | u_1, u_2)$ 은 독립적인 채널 W 의 입력 $u_1 \oplus u_2$ 에 대한 출력 y_1 에 대한 천이 확률과 채널 W 의 입력 u_2 에 대한 출력 y_2 에 대한 천이 확률

의 곱으로 식 (1)과 같이 계산된다.

$$W_2(y_1, y_2 | u_1, u_2) = W(y_1 | u_1 \oplus \eta u_2) W(y_2 | u_2), \quad (1)$$

여기서 u_i ($i = 1, 2, \dots, N$)는 입력 메시지의 i 번째 심볼을 뜻하며 y_i ($i = 1, 2, \dots, N$)는 수신된 i 번째 심볼을 뜻한다. 또한, η 는 유한체 (finite field) $GF(2^m)$ 의 원소이며, \oplus 는 $GF(2^m)$ 의 모듈러 연산을 의미한다. 그림 1과 같이 두 개의 독립적인 채널 W_2 를 합성하여 W_4 를 만들며 이 때 W_4 에 대한 천이 확률은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} W_4(y_1^4 | u_1^4) \\ = W_2(y_1, y_3 | u_1 \oplus \eta u_3, u_2 \oplus \eta u_4) W_2(y_2, y_4 | u_2, u_4) \\ = W(y_1 | u_1 \oplus \eta u_2 \oplus \eta u_3 \oplus \eta^2 u_4) W(y_2 | u_2 \oplus \eta u_4) \\ W(y_3 | u_3 \oplus \eta u_4) W(y_4 | u_4) \end{aligned} \quad (2)$$

채널 양극화의 두 번째 단계인 채널 분리는 합성 채널 W_N 을 다시 N 개의 채널 $W_N^{(i)}, 1 \leq i \leq N$ 들로 분리하는 과정이다. 이 때 $W_N^{(i)}$ 는 식 (3)과 같이 수학적으로 계산된다.

$$W_N^{(i)}(y_1^N, u_1^{i-1} | u_i) = \sum_{u_{i+1}^N} \frac{1}{q^{N-i}} W_N(y_1^N | u_1^N). \quad (3)$$

이러한 채널 합성과 채널 분리의 과정은 비이진 극 부호의 부호 및 SC(successive cancellation) 복호 과정과 대응되며 일반적인 비이진 극 부호의 SC 복호 과정은 알고리즘 1과 같다. 최종 계산된 N 개의 분리 채널에 대해, $GF(2^m)$ 위의 모든 가능한 원소에 대응되는 천이 확률 중 가장 큰 확률 값에 대응되는 심볼 \hat{u}_i 가 최종 결정된다. 이

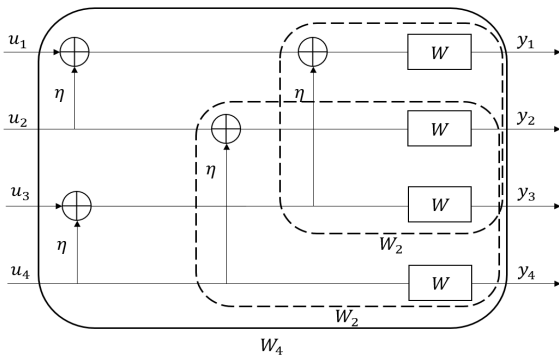


그림 1. 채널 합성 과정 ($N=4$)

Fig. 1. Channel combining phase ($N=4$).

Algorithm 1. Procedure of SC DECODING^[10].

· INPUT : $N, K, R, \mathbf{u}_{A^c}$ = information symbols vector, A = set of indices of frozen symbols

· OUTPUT : $\hat{\mathbf{u}}_{A^c}$ = decoded information symbols vector

Initialize the information symbols vector $\mathbf{u}_{A^c}^K = \text{rand}()$ -function to generate random numbers and decoded informations symbols vector $\hat{\mathbf{u}}_{A^c} = 0$

for $i = 1, 2, \dots, N$

if $i \in A$ // frozen symbols

$\hat{u}_i \leftarrow u_i$

else // information symbols

$\hat{u}_i \leftarrow \underset{u_i \in GF(2^m)}{\text{argmax}} W_n^{(i)}(y_1^N, \hat{u}_0^{i-1} | u_i)$

end

end

return $\hat{\mathbf{u}}_{A^c}$;

때, i 가 고정 심볼 위치의 집합을 나타내는 집합 A 의 원소이면 송 · 수신단이 사전에 약속한 고정 심볼로 최종 결정된다.

III. 제안하는 고정 심볼 선택 방법

이전 II 장으로부터 채널 양극화는 채널 합성과 분리를 통해 이루어짐을 알 수 있었다. 채널 분리는 송신단과 수신단이 약속한 고정 심볼값의 전송과 SC 복호기로 유사 구현이 가능하다. 채널 양극화를 통하여 부호율에 따라, 신뢰도가 높은 채널에는 정보 심볼을 전송하며 상대적으로 낮은 심볼에는 고정 심볼을 전송한다. 이때, 부호어를 구성하는 각각의 심볼들에 대응되는 채널의 신뢰도를 정확히 추정하는 것은 매우 중요하다.

본 장에서는 BLER 방정식을 기반으로 한 비이진 극 부호에 대한 고정 심볼 선택 방법을 제안한다. B_i 는 i 번째 심볼이 정확히 복호되지 않는 사건 $\hat{u}_i \neq u_i$ 와 이전 심볼들이 정확히 복호될 사건 $\hat{u}_1^{i-1} = u_1^{i-1}$ 의 결합 사건 (Joint Event)으로 정의한다. 여기서 u_i ($i = 1, 2, \dots, N$)은 소수와 소수의 거듭제곱의 크기를 갖는 유한체 $GF(p^m)$ 위의 원소이다. 또한, ϵ 는 메시지 블록이 정확히 복호되지 않을 사건이고 ϵ^c 은 ϵ 의 여사건으로 정의한다. 블록 오류 사건 ϵ 은 모든 가능한 사건 B_i 들의 합집합으로 표현된다.

그러나 확률 $P(\hat{u}_i \neq u_i)$ 와 $P(\hat{u}_1^{i-1} = u_1^{i-1})$ 는 서로 독립적이지 않기 때문에, $P(C_i)$ 를 추정하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 사건 C_i 와 C_i^c 을 식 (4)와 같이 정의한다.

$$C_i = \{\hat{u}_i \neq u_i \mid \hat{u}_1^{i-1} = u_1^{i-1}\}, \quad (4)$$

사건 C_i 와 C_i^c 의 확률 $P(C_i)$ 와 $P(C_i^c)$ 은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P(C_i) &= P(\hat{u}_i \neq u_i \mid \hat{u}_1^{i-1} = u_1^{i-1}) \\ &= \frac{P(\hat{u}_i \neq u_i, \hat{u}_1^{i-1} = u_1^{i-1})}{P(\hat{u}_1^{i-1} = u_1^{i-1})}, \\ P(C_i^c) &= P(\hat{u}_i = u_i \mid \hat{u}_1^{i-1} = u_1^{i-1}) \\ &= 1 - P(C_i). \end{aligned} \quad (5)$$

SC 복호 과정 중, 이전에 결정된 심볼들인 u_1^{i-1} 이 정확하다는 가정하에 $\hat{u}_i \neq u_i$ 일 확률 $P(C_i)$ 는 쉽게 얻어질 수 있다. 사건 ϵ^c 의 확률 $P(\epsilon^c)$ 은

$$\begin{aligned} P(\epsilon^c) &= P(\hat{u}_1^N = u_1^N) \\ &= P(\hat{u}_1 = u_1)P(\hat{u}_2 = u_2 \mid \hat{u}_1 = u_1) \cdots \\ &\quad P(\hat{u}_N = u_N \mid \hat{u}_1^{N-1} = u_1^{N-1}) \\ &= P(C_1^c)P(C_2^c) \cdots P(C_N^c), \end{aligned} \quad (6)$$

로 계산된다. 이로부터 부호어가 정확히 복호되지 않을 확률 $P(\epsilon)$ 은 식 (7)과 같이 계산된다.

$$P(\epsilon) = 1 - P(\epsilon^c) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P(C_i)). \quad (7)$$

$P(C_i)$ 는 i 번째 심볼 이전에 결정된 심볼들인 u_1^{i-1} 이 정확하다는 가정하에, i 번째 분리 채널의 천이 확률을 정확히 구한 식이며, $P(\epsilon)$ 은 비이진 극 부호의 BLER의 정확한 표현이다. 따라서, $P(\epsilon)$ 을 0에 근접하도록 비이진 극 부호를 설계하면 오류정정률을 극대화시킬 수 있다. $P(C_i)$ 의 근사적 추정을 통해, $P(\epsilon)$ 을 0에 근접하도록 비이진 극 부호를 설계할 수 있기에, $P(C_i)$ 를 정확히 추정하는 것이 중요하다. 추정된 N 개의 $P(C_i)$ 중 $P(C_i)$ 가 상대적으로 높은 심볼 인덱스 i 에는 송·수신단이 알고 있는 고정 심볼을 실어 보내어, 해당 인덱스의 오류 확률 $P(C_i)$ 를 0이 되도록 만든다. 반대로 $P(C_i)$ 가 낮은 심볼

Algorithm 2. Procedure of FROZEN SYMBOLS SELECTION.

```

• INPUT :  $N, K, R, n_1^N$ =AWGN noise vector,  $S$ =Sampling Count,
          designed-SNR
• OUTPUT :  $V_1^N$ =SER vector of symbols indices of length  $N$ 

Initialize the encoded symbols vector  $c_1^N = 0$ , SER vector  $V_1^N = 0$  and decision
vector  $\hat{u}_1^N = 0$ 
for  $i = 0, 1, \dots, S-1$ 
     $y_1^N = c_1^N + n_1^N$  //  $y_1^N$ =received vector via AWGN channel
    SC DECODING
    for  $j = 0, \dots, N-1$ 
        if  $\hat{u}_j \neq 0$ 
             $V_j++$ 
        end
    end
end
end
    
```

인덱스 i 에는 정보 심볼을 실어 보냄으로써, 전체 블록 오류율 $P(\epsilon)$ 을 최소화할 수 있다. $P(C_i)$ 는 알고리즘 2와 같이 제안된 고정 심볼 선택 방법을 통해 근사적으로 추정이 가능하다.

본 논문에서 제안하는 고정 심볼 선택 방법은 알고리즘 2를 통해 구현이 가능하다. 우선 비이진 극 부호의 길이 N 의 부호어에 고정 심볼들을 전송한다. 주어진 designed-SNR(designated-signal to noise ratio)에 대응되는 채널을 거쳐 수신된 길이 N 의 벡터를 SC 복호한다. 이때, 일반적인 SC 복호와 달리 i 번째 심볼을 결정할 때, 고정된 부호어를 전송하였으므로 이전 심볼들인 u_1^{i-1} 를 정확히 결정할 수 있고 SC 복호를 통해 i 번째 심볼 \hat{u}_i 이 결정된다. 만약 심볼 $\hat{u}_i \neq u_i$ 이면 SER(symbol error rate) 벡터 V_1^N 의 i 번째 원소값이 1만큼 증가한다. 따라서 주어진 샘플 횟수 S 만큼 이러한 과정이 반복 수행된 후, 각 분리 채널의 SER값으로 이루어진 SER 벡터 V_1^N 을 구할 수 있다. 또한 SER 벡터 V_1^N 의 원소들을 샘플 횟수 S 로 정규화한 V_1^N/S 의 원소들로부터 $P(C_i), i=1, 2, \dots, N$ 이 근사적으로 추정된다. 이 때, designed-SNR은 RE_s/N_0 로 정의되며, E_s 는 심볼당 에너지, N_0 는 잡음 전력 스펙트럼 밀도를 의미한다. 근사적으로 추정된 각 분리 채널들에 대한 $P(C_i)$ 에 대해, 추정된 $P(C_i)$ 값이 상대적으로 높은 $N-K$ 개의 분리 채널들에 대응하는 심볼 위치에는 고정 심볼을 전송

하고 그 외의 K 개의 분리 채널들에 대응되는 심볼 위치에는 정보 심볼을 전송함으로써 비이진 극 부호가 구성된다. 따라서, 본 논문에서 제안한 고정 심볼 선택 방법 적용 시, 비교적 정확한 방법으로 비이진 극 부호를 설계할 수 있다. 또한, 멀티 커널을 갖는 비이진 극 부호의 부호 및 SC 복호 과정과 2×2 커널을 갖는 비이진 극 부호의 부호 및 SC 복호 과정은 동일하기에^[11], 멀티 커널을 갖는 비이진 극 부호는 본 논문에서 제안한 고정 심볼 선택 방법 통해 설계가 가능하다는 이점이 있다. 더불어, 본 논문에서 제안한 고정 심볼 선택 방법을 적용할 때, designed-SNR은 중요하게 고려해야 할 파라미터이다. Designed-SNR 함수는 부호어의 길이, 부호율을 변수로 갖는다.

따라서, 이후 IV장에서는 제안한 고정 심볼 선택 방법으로 비이진 극 부호를 설계하여 여러 designed-SNR에 따른 블록 오류율을 확인하고 분석한다.

IV. 실험 결과

본 논문의 모의실험에서는 III장에서 소개한 방법으로 비이진 극 부호를 설계하여 블록 오류율을 분석한다. Designed-SNR은 -10 dB에서 10 dB 사이의 정수값으로 설정한다. 부호어의 길이 N 은 $64, 256$ 으로 설정하고 부호화율 R 은 $1/2, 1/4$ 로 고려한다. 채널은 가산성 백색 가우시안 잡음 채널 그리고 샘플링 횟수는 $10,000$ 번을 고려한다. 또한 유한체는 소수의 거듭제곱인 $GF(2^4)$ 을 고려하며 커널은 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \eta & 1 \end{bmatrix}$ 를 고려한다. 이때, η 는 α^5 을 고려한다.

그림 2 및 그림 3의 실험 결과는 부호어의 길이 N 이 64 이며 부호율이 각각 $1/2, 1/4$ 인 경우의 블록 오류율이다. 그리고 그림 4 및 그림 5의 실험 결과는 부호어의 길이 N 이 256 이며 부호율이 각각 $1/2, 1/4$ 인 경우의 블록 오류율이다. 표 1은 블록 오류율 10^{-3} 이하에서 상대적으로 우수한 블록 오류율을 갖는 designed-SNR들을 나열한 것이다. 그림 2와 그림 4의 실험 결과를 통해 R 이 $1/2$ 인 경우, designed-SNR을 $-2, -1, 0, +1, +2, +3$ 으로 설정하였을 때, 우수한 성능을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 그림 3 및 그림 5의 실험 결과를 통해 R 이 $1/4$ 인 경우에는 designed-SNR을 $-6, -3, -2, -1, 0$ 으로 가정하였을 때

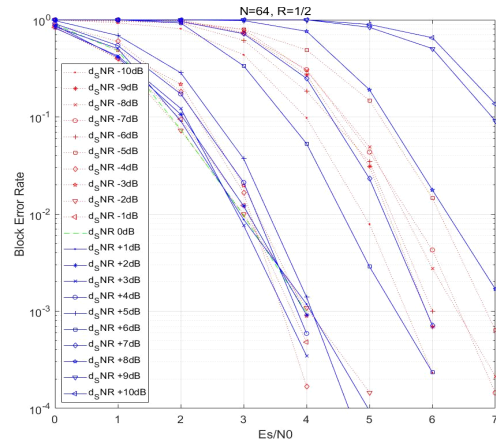


그림 2. Designed-SNR에 따른 블록 오류 성능($N=64$, $K=1/2$)

Fig. 2. Block error rate performance according to designed-SNR ($N=64$, $R=1/2$).

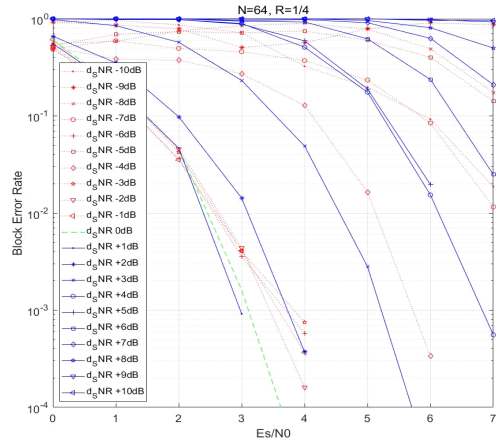


그림 3. Designed-SNR에 따른 블록 오류 성능($N=64$, $K=1/4$)

Fig. 3. Block error rate performance according to designed-SNR ($N=64$, $R=1/4$).

우수한 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, R 이 낮을수록 낮은 designed-SNR에서도 우수한 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다.

또한, 그림 2~그림 5의 실험 결과에서 designed-SNR이 $-2, -1, 0$ 으로 설정하였을 때 모두 우수한 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 실험 결과를 통해, 본 논문에서 제안한 고정 심

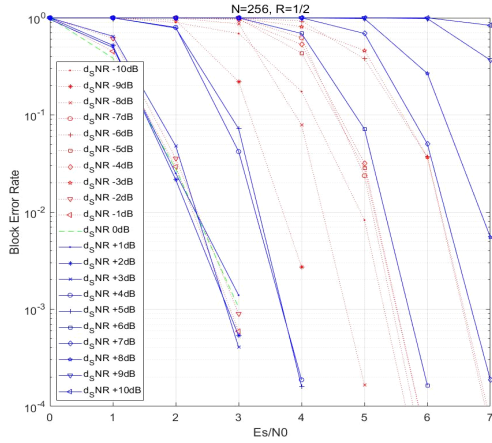


그림 4. Designed-SNR에 따른 블록 오류 성능($N=256$, $K=1/2$)

Fig. 4. Block error rate performance according to designed-SNR ($N=256$, $R=1/2$).

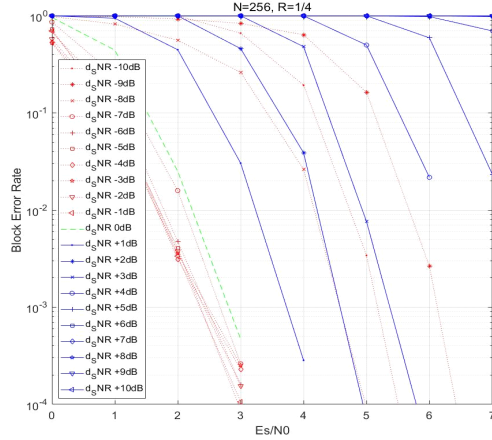


그림 5. Designed-SNR에 따른 블록 오류 성능($N=256$, $K=1/4$)

Fig. 5. Block error rate performance according to designed-SNR ($N=256$, $R=1/4$).

표 1. 우수한 오류정정률을 갖는 designed-SNR
Table 1. Designed-SNR with good block error rate.

N	R	Designed-SNR [dB]
64	1/2	-4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5
64	1/4	-6, -3, -2, -1, 0, +1, +2
256	1/2	-2, -1, 0, +1, +2, +3
256	1/4	-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0

볼 선택 방법으로 비이진 극 부호를 설계할 때, designed-SNR은 부호율과 부호어의 길이를 변수로 갖는 함수임을 알 수 있다. 또한, designed-SNR을 어떻게 설정하느냐에 따라 블록 오류의 성능이 확연히 상이한 양상을 띠는 것을 확인할 수 있기에, designed-SNR을 어떻게 설정하는지는 비이진 극 부호 설계에 있어 매우 중요하게 고려되어야 할 파라미터임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 비이진 극 부호의 고정 심볼 선택 방법을 제안하였다. 비이진 극 부호의 $P(C_i)$ 를 실험적으로 추정 시, 어떤 designed-SNR을 선택하는지는 매우 중요한 요소이며, designed-SNR 함수는 부호화율 및 부호어의 길이를 변수로 갖는 함수이다. IV장의 실험에 따라, designed-SNR을 -2 dB, -1 dB 그리고 0 dB로 설정하였을 경우 모두 우수한 블록 오류율을 가지는 것을 알 수 있었다.

차후에는 다양한 부호어의 길이 및 부호화율에 따른 우수한 성능을 갖는 designed-SNR을 체계적으로 갖는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

References

- [1] E. Arıkan, "Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051-3073, Jul. 2009.
- [2] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Multiplexing and Channel Coding (Release 15), 3GPP TS 38.212 v15.1.1, Apr. (2018).
- [3] A. Alamdar-Yazdi, F. R. Kschischang, "A simplified successive-cancellation decoder for polar codes," *IEEE Communications Letter*, vol. 15, no. 12, pp. 1378-1380, Dec. 2011.
- [4] S. Lee, H. Lee, K.-H. Park, and J. Heo, "Improved soft-output decoding of polar codes for high throughput,"

in 2018 Korean Institute of Communications and Information Sciences Conference, Jeju, Jun. 2018, pp. 1196-1197.

- [5] B. Yuan, K. K. Parhi, "Low-latency successive-cancellation polar decoder architectures using 2-bit decoding," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 61, no. 4, pp. 1241-1254, Apr. 2014.
- [6] S. Cayci, T. Koike-Akino and Y. Wang, "Nonbinary polar coding for multilevel modulation," in *Optical Fiber Communication Conference 2019*, San Diego, CA, Mar. 2019.
- [7] I. Tal, A. Vardy, "How to construct polar codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 59, no. 10, pp. 6562-6582, Oct. 2013.
- [8] P. Trifonov, "Efficient design and decoding of polar codes," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 11,

pp. 3221-3227, Nov. 2012.

- [9] D. Wu, Y. Li, and Y. Sun, "Construction and block error rate analysis of polar codes over AWGN channel based on gaussian approximation," *IEEE Communication Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 1099-1102, Jul. 2014.
- [10] A. Balatsoukas-Stimming, M. B. Parizi, and A. Burg, "LLR-based successive cancellation list decoding of polar codes," in *39th International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'2014)*, Florence, Mar. 2014, pp. 3903-3907.
- [11] S. C. Byun, G. Kim, W. J. Kim and H. -Y. Song, "A construction of non-binary polar codes with 4 by 4 kernels," in *9th International Workshop on Singal Design and its Applications in Communications (IWSDA'19)*, Dongguan, Oct. 2019, pp. 1-5.

변 성 철 [LIG넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1655-9103>



2018년 2월: 울산대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2020년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2021년 11월~현재: LIG넥스원 전자전연구
 소 연구원
 [주 관심분야] 무선통신 신호처리, 채널

코딩

김 동 호 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3911-8746>



2009년 2월: 인천대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2011년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터통신 공학과 (공학석사)
 2011년 1월~2011년 12월: 한국항공우주산업 연구원
 2012년 1월~현재: LIG넥스원 전자전연구

소 수석연구원

[주 관심분야] 전자전 안테나, 통신 전자전 시스템 등

노 재 현 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5810-5364>



2015년 2월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2017년 2월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2021년 2월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학박사)
 2022년 5월~현재: LIG넥스원 전자전연구

소 선임연구원

[주 관심분야] 무선통신 신호처리

강 현 진 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1770-2634>



2006년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)
 2008년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
 2011년 12월~현재: LIG넥스원 전자전연구
 소 수석연구원
 [주 관심분야] 전자전 신호처리, 디지털

통신