

# 조기 종료 신뢰 전파 복호 기법을 이용한 극 부호 연속 제거 복호기의 지연감소 기법

이 충 수\*, 박 찬 수\*, 최 수 용\*, 오 왕 록<sup>o</sup>

## Hybrid Decoding Scheme with Successive Cancellation and Early Termination Belief Propagation Decoding

Chungsu Lee\*, Chansoo Park\*, Suyong Choi\*, Wangrok Oh<sup>o</sup>

### 요 약

극 부호 (polar codes) 의 대표적인 복호 기법으로 연속 제거 복호 기법 (successive cancellation decoding)과 신뢰 전파 복호 기법 (belief propagation decoding)을 들 수 있다. 연속 제거 복호 기법은 신뢰 전파 복호 기법에 비해 복호 성능이 우수하며 복호 복잡도가 낮은 장점이 있으나 정보 비트가 순차적으로 복호 되는 특성으로 인하여 복호 지연시간이 큰 단점이 있다. 반면, 신뢰 전파 복호 기법은 연속 제거 복호 기법대비 복호 지연시간이 짧으나 복호 성능이 열화되고 복호에 요구되는 계산 복잡도가 높은 단점이 있어 이를 개선하기 위하여 조기 종료 신뢰 전파 복호 기법이 제안되었다. 본 논문에서는 연속 제거 복호기에서 후반부에 복호되는 정보 비트들을 조기 종료 신뢰 전파 복호 기법으로 복호 함으로써 복호 지연시간을 줄일 수 있는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 일반적인 연속 제거 복호 기법과 유사한 복호 복잡도와 복호 성능을 제공하며 복호 지연시간을 줄일 수 있는 장점이 있다.

**Key Words** : Channel coding, Polar code, Successive cancellation decoding, Belief propagation decoding, Latency

### ABSTRACT

Two decoding schemes including successive cancellation (SC) decoding and belief propagation (BP) decoding were proposed for polar codes. The SC decoding scheme offers better bit error rate (BER) performance and requires lower complexity but requires more decoding latency compared to the BP decoding scheme. To reduce the complexity and decoding latency of the BP decoding scheme further, an early termination BP decoding scheme was proposed. In this paper, we propose a hybrid decoding scheme to reduce decoding latency by using the early termination BP decoding scheme in part in the conventional SC decoder. With the proposed scheme, the decoding latency can be reduced without performance loss and increase in complexity compared to the conventional SC decoder.

\* 본 논문은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-004)

• First Author : Dept. of Information Communications Eng., Chungnam National University, lcs13@o.cnu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Dept. of Information Communications Eng., Chungnam National University, kingrock@cnu.ac.kr, 종신회원

\* Dept. of Information Communications Eng., Chungnam National University, pcs2106@o.cnu.ac.kr; tndyd4024@o.cnu.ac.kr

논문번호 : 202304-069-A-RN, Received April 4, 2023; Revised May 13, 2023; Accepted May 23, 2023

## I. 서론

극 부호<sup>[1]</sup> (polar code)는 5G NR (new radio) 시스템에서 PBCH (physical broadcast channel)을 위한 채널 부호로 채택되었으며 극 부호의 복호 성능 개선과 복호 복잡도 및 지연시간 등을 낮추기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 극 부호의 대표적인 복호 기법으로 연속 제거 (successive-cancellation, SC) 복호 기법<sup>[1]</sup>과 신뢰 전파 (belief-propagation, BP) 복호 기법<sup>[2]</sup>을 들 수 있다. SC 복호 기법은 BP 복호 기법보다 복호 성능이 우수할 뿐만 아니라 복호 복잡도가 낮은 장점이 있으나 정보 비트가 순차적으로 복호 되는 특성으로 인하여 복호 지연시간이 크다. 반면, BP 복호 기법은 SC 복호 기법대비 복호 지연시간이 짧으나 복호 성능이 열화되며 계산 복잡도가 높은 특징을 보인다.

BP 복호 기법의 경우 복호과정에서 미리 설정된 횟수만큼 반복 복호를 수행하며 반복 복호 횟수가 증가할수록 복호과정에서 요구되는 계산 복잡도가 증가한다. 반복 복호로 인해 발생하는 높은 계산 복잡도를 개선하고 복호 지연시간을 낮추기 위하여 반복 복호마다 모든 부호 비트들의 로그 우도 비 (log likelihood ratio, LLR)의 절대값이 임계값보다 큰 경우 반복 복호를 중단하는 조기 종료 신뢰 전파 (early-termination belief-propagation, ET-BP) 복호 기법<sup>[3]</sup>이 제안되었다. 제안된 기법은 높은 신호 대 잡음 비 (signal-to-noise ratio, SNR) 영역에서 평균 반복 복호 횟수를 줄임으로써 복호 성능은 유지하면서 계산 복잡도와 평균 복호 지연시간을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 SC 복호 기법과 ET-BP 복호 기법을 혼용하여 SC 복호 기법의 복호 지연시간을 줄일 수 있는 기법에 대해 제안한다. 제안하는 기법은 SC 복호 기법으로 복호를 시작하고 특정 복호 순서 이후의 정보 비트들에 대해서는 ET-BP 복호 기법을 이용하여 복호한다. 제안하는 기법은 SC 복호 기법과 유사한 복호 성능과 복잡도를 가지며 낮은 복호 지연시간을 갖는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 시스템 모델과 극 부호의 복호 기법을 설명한다. 3장에서는 제안하는 기법을 설명하고 4장에서는 제안하는 기법의 성능 개선 정도를 확인하고 5장에서

결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템 모델은 그림 1과 같다. 극 부호의 메시지 벡터  $\mathbf{u} = [u_0, u_1, \dots, u_{N-1}]$ 은 정보 비트와 고정 비트 (frozen bit)로 구성된다. 부호율이  $K/N$ 일 때 메시지 벡터  $\mathbf{u}$ 의 원소  $u_k, k = 0, 1, \dots, N-1$  중 인덱스  $k \in I$ 인  $u_k$ 에는  $(N-K)$ 개의 고정 비트 0을 할당하고,  $k \in I^c$ 인  $u_k$ 에는 입력 받은  $K$ 개의 정보 비트가 할당된다. 여기에서  $I^c$ 와  $I$ 는 각각 고정 비트와 정보 비트의 인덱스 집합으로 극 부호 설계과정<sup>[1,6,7]</sup>에서 결정된다. 메시지 벡터  $\mathbf{u}$ 는 식 (1)과 같은 과정을 통해 부호어 (code word)  $\mathbf{c} = [c_0, c_1, \dots, c_{N-1}]$ 를 생성하며 여기에서  $\mathbf{G}_N$ 은  $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 을  $n = \log_2 N$ 차 크로네커 제곱 (Kronecker power) 연산하여 생성된 극 부호 생성행렬 (generator matrix)이다.

$$\mathbf{c} = \mathbf{u} \mathbf{G}_N \tag{1}$$

생성된 부호어는  $x_k = (-1)^{c_k}$ 과 같이 BPSK (binary phase shift keying) 변조된 후 양 대역 전력 밀도가  $N_0/2$ 인 가산성 백색 잡음 채널 (additive white Gaussian noise channel)을 통해 전송되는 것을 가정하였다. 결정 변수 (decision variable)  $y_k = x_k + n_k$ 로 표현할 수 있으며 이때  $n_k$ 는 평균이 0, 분산이  $N_0/2$ 인 가우시안 랜덤 변수 (Gaussian random variable)이다. 극 부호의 복호기에서는 수신된 신호  $y_k$ 를 통해 식 (2)와 같이 계산된 부호 비트들의 로그 우도 비값  $L(c_k)$ 로 메시지 벡터에 대한 추정값  $\hat{u}_k$ 를 출력한다.

$$L(c_k) = \ln \frac{P(y_k | c_k = 0)}{P(y_k | c_k = 1)} \tag{2}$$

대표적인 극 부호 복호 기법들인 SC 복호 기법과 BP 복호 기법 팩터 그래프를  $N=4$ 인 경우에 대해서도

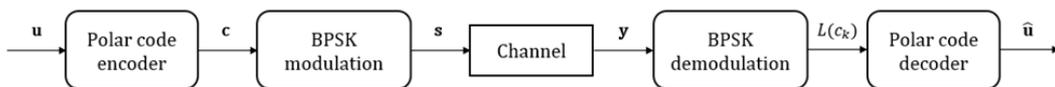


그림 1. 시스템 모델  
Fig. 1. system model

식화하면 각각 그림 2 및 3과 같다. 여기에서  $(l, k)$ ,  $l = 0, 1, \dots, \log_2 N$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$ 는  $l$ 번째 단계의  $k$ 번째 노드를 의미한다. 그림 2와 3에 도식화된 팩터 그래프는 그림 4와 5에 나타난 단위 팩터 그래프의 반

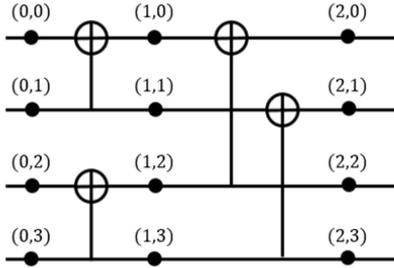


그림 2. SC 복호기의 팩터 그래프 ( $N = 4$ )  
Fig. 2. Factor graph for SC decoder ( $N = 4$ )

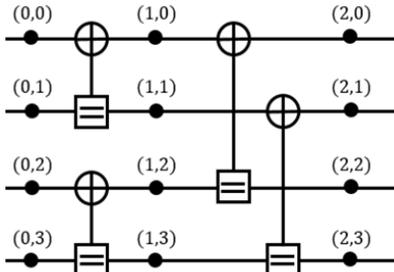


그림 3. BP 복호기의 팩터 그래프 ( $N = 4$ )  
Fig. 3. Factor graph for BP decoder ( $N = 4$ )

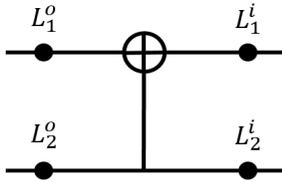
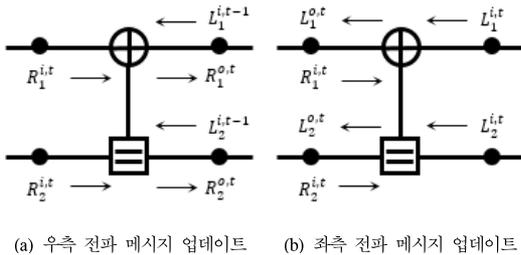


그림 4. SC 복호기의 단위 팩터 그래프  
Fig. 4. Unit factor graph for SC decoder



(a) 우측 전파 메시지 업데이트 (b) 좌측 전파 메시지 업데이트

그림 5. BP 복호기의 단위 팩터 그래프  
Fig. 5. Unit factor graph for BP decoder

복된 구조로 나타낼 수 있다. SC 복호 기법에서는  $(n, k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$  노드들에 식 (2)를 통해 계산된  $L(c_k)$ 를 할당한 다음  $n-1, n-2, \dots, 0$  단계의 노드들에 대한 로그 우도비 값이 순차적으로 계산되며 이때 사용되는 계산 방법은 그림 4에 도식화된 단위 팩터 그래프로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} L_1^o &= f(L_1^i, L_2^i) \\ L_2^o &= g(L_1^i, L_2^i, a) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서  $f$ 함수와  $g$ 함수는 식 (4)와 같이 계산되며  $a$ 는 그림 4의  $L_1^o$ 에 대한 경 판정 (hard decision) 된 비트값을 나타낸다. 메시지 비트  $u_k$ 에 대한 복호 결과인  $\hat{u}_k$ 는  $k \in F$ 인 경우 '0'으로 판정되며  $k \in I$ 인 경우에는  $(0, k)$  노드의 로그 우도비 값이 '0'보다 크거나 같은 경우에는  $\hat{u}_k = 0$ , 그렇지 않은 경우에는  $\hat{u}_k = 1$ 로 판정된다.

$$\begin{aligned} f(L_1, L_2) &= 2 \tanh^{-1}(\tanh(L_1/2) \tanh(L_2/2)) \\ &\approx \text{sign}(L_1) \text{sign}(L_2) \times \min(|L_1|, |L_2|) \\ g(L_1, L_2) &= (-1)^a L_1 + L_2 \end{aligned} \quad (4)$$

SC 복호 기법은 비트의 복호가 순차적으로 이루어짐으로 복호 시 요구되는 복호 지연시간은  $O(N)$ 으로 나타낼 수 있으며<sup>[4]</sup> 복호 시 모든 노드에 대한 로그 우도비 계산이 요구됨으로 계산 복잡도는  $O(N \log_2 N)$ 으로 나타낼 수 있다<sup>[1]</sup>.

BP 복호 기법에서는 미리 설정된  $I_m$ 만큼의 반복 복호를 수행한다.  $t, 1 \leq t \leq I_m$  번째 반복 복호에서는 팩터 그래프 우측에서 좌측으로 계산되는  $(l, k)$  노드의 로그 우도비  $L_{l,k}^t$ 와 좌측에서 우측으로 계산되는  $(l, k)$  노드의 로그 우도비  $R_{l,k}^t$ 가 계산되며 반복 복호를 위해  $L_{l,k}^0, R_{l,k}^0, l = 0, 1, \dots, \log_2 N, k = 0, 1, \dots, N-1$ 에는 식 (5)와 같이 초기값을 설정한다.

$$\begin{aligned} L_{l,k}^0 &= \begin{cases} L(c_k), & l = \log_2 N \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \\ R_{l,k}^0 &= \begin{cases} \infty, & l = 0, k \in F \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

매 반복 복호에서는  $R_{l,k}^t$ 를 먼저 업데이트 후  $L_{l,k}^t$ 를

업데이트하며  $L_{l,k}^t$  및  $R_{l,k}^t$  가 계산되는 과정은 그림 5의 (a), (b)에 나타난 단위 팩터 그래프를 기준으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} R_1^{o,t} &= f(R_1^{i,t}, R_2^{i,t} + L_2^{i,t-1}) \\ R_2^{o,t} &= f(R_1^{i,t}, L_1^{i,t-1}) + R_2^{i,t} \\ L_1^{o,t} &= f(L_1^{i,t}, R_2^{i,t} + L_2^i) \\ L_2^{o,t} &= f(L_1^{i,t}, R_1^{i,t}) + L_2^{i,t} \end{aligned} \quad (6)$$

$I_m$  만큼의 반복 복호가 종료된 후  $L_{0,k}^{I_m} + R_{0,k}^{I_m}$  이 '0'보다 크거나 같은 경우  $\hat{u}_k = 0$ , 그렇지 않은 경우  $\hat{u}_k = 1$ 로 판정된다. BP 복호 기법의 경우  $L_{l,k}^t$  및  $R_{l,k}^t$ 를 각각 계산하는데  $l$ 번째 단계의 모든 노드의 로그 우도 비가 동시에 업데이트됨으로 복호 시 요구되는 지연시간은  $O(2I_m \log_2 N)$ 으로 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>. 한편 매 반복 복호 시 모든 노드에 대한  $L_{l,k}^t$  및  $R_{l,k}^t$ 가 업데이트됨으로 복호 시 요구되는 계산 복잡도는  $O(2I_m M \log_2 N)$ 으로 비교적 높은 편이다<sup>[5]</sup>.

BP 복호 기법은  $I_m$ 이 커질수록 계산 복잡도와 복호 지연시간이 증가하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 [3]에서는 부호 비트 로그 우도 비들의 절대값이 임계값보다 큰 경우 반복 복호를 종료하는 ET-BP 복호 기법이 제안되었다. 제안된 기법에서는 한 번의 복호가 끝날 때마다  $l=0$ 에 해당하는 모든 노드의  $|L_{0,k}^t + R_{0,k}^t|$ ,  $k=0,1,\dots,N-1$  값을 미리 설정된 임계값  $T$ 와 비교하여  $|L_{0,k}^t + R_{0,k}^t| \geq T$ ,  $k=0,1,\dots,N-1$ 인 경우 반복 복호를 종료한다. 제안된 기법은 기존의 BP 복호 기법과 유사한 복호 성능을 제공하며 계산 복잡도와 복호 지연시간을 줄일 수 있다.

### III. 제안하는 기법

극 부호의 경우 후반부에 복호되는 비트 채널의 신뢰도가 전반부에 복호되는 비트 채널의 신뢰도 보다 높은 경향을 보인다<sup>[8]</sup>. 본 논문에서는 가우시안 근사 (Gaussian approximation) 기법<sup>[7]</sup>을 이용한 극 부호 설계를 가정하였다. 설계 신호 대 잡음 비 (designed SNR)  $\eta$ 로 2 dB를 사용하여  $N=32$ 인 극 부호를 설계하였을 때  $(l, k)$  노드의 로그 우도 비 절대값을 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 기존 연구 결과 [8]과 유사하게 같은  $l$  단계에서 후반부  $k$ 개 노드의 로그 우도 비 절대값이 나머지 노드들보다 큰 특징이

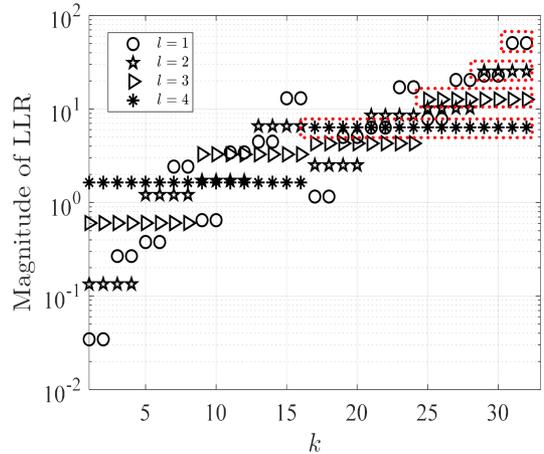


그림 6. 단계별 각 노드의 로그 우도 비 ( $N=32$ )  
Fig. 6. LLRs of each node

있다. 한편, 임계값을 활용한 ET-BP 복호 기법의 경우 수신 신호의 신호 대 잡음 비가 커져 초기값으로 설정되는  $L_{\log_2 N, k}^0, k=0,1,\dots,N-1$ 의 절대값이 커질수록 평균 반복 복호 횟수가 줄어드는 특징이 있다<sup>[3]</sup>. 본 논문에서는 이러한 두 특징을 활용해 SC 복호 기법에서 특정 비트 이후부터는 ET-BP 복호 기법으로 복호 하여 비트 오류 성능 열화 없이 복호 지연시간을 줄일 수 있는 기법을 제안한다. 제안하는 기법에서는 메시지 비트 중 전반부  $N(1 - \frac{1}{C})$ 개의 비트에 대해 SC 복호 기법으로 복호한 후 남은  $\frac{N}{C}$ 개의 비트에 대해서는 ET-BP 복호 기법으로 복호한다. 여기에서  $C$ 는  $2^m$ ,  $0 \leq m \leq \log_2 N - 1$ 이며  $C$ 를 '1' 혹은  $N$ 으로 설정할 경우 제안하는 기법은 각각 ET-BP 및 SC 복호 기법과 동일하다. 제안하는 기법의 팩터 그래프를  $N=8$ 이고  $C=2$ 인 경우에 대해 도식화하면 그림 7과 같다. 그림 7에서 ET-BP 복호 기법으로 복호되는 부분 중 (2,4), (2,5), (2,6) 및 (2,7) 노드들의 초기값으로는 SC 복호 기법을 통해 계산된 비교적 큰 신뢰도를 갖는 해당 노드들에 대한 로드 우도 비 값이 사용된다. 제안하는 기법에서 ET-BP 복호를 위한  $(l, k)$ ,  $0 \leq l \leq \log_2 \frac{N}{C}$ ,  $N(1 - \frac{1}{C}) \leq k \leq N-1$  노드들의 초기값은 식 (7)과 같이 설정하며 여기에서  $L_{l,k}$ 는 SC 복호 기법을 통해 계산된  $(l, k)$  노드의 로그 우도 비 값이다.

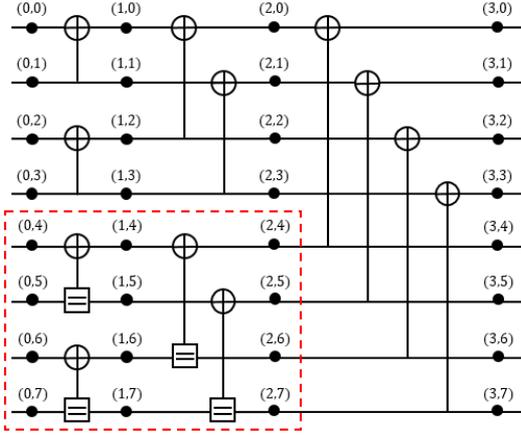


그림 7. 제안하는 복호기의 팩터 그래프 ( $N = 8, C = 2$ )  
Fig. 7. Factor graph for proposed decoder ( $N = 8, C = 2$ )

$$L_{l,k}^0 = \begin{cases} L_{l,k}, & l = \log_2(N/C) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$R_{l,k}^0 = \begin{cases} \infty, & l = 0, k \in F \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

초기값 설정 이후 식 (6)을 이용하여 후반부  $\frac{N}{C}$ 개의 비트들에 대해 ET-BP 복호를 수행한다. 이때 제안하는 기법에서 ET-BP 복호 기법으로 복호되는 부분의 초기값은 비교적 신뢰도가 크므로 반복 복호 횟수가 크지 않을 것을 예상할 수 있다. 또한, 초기값의 신뢰도가 크기 때문에 첫 번째 반복 복호과정에서  $L_{l,k}^1$  업데이트만으로도 충분히 조기 종료 조건을 만족할 수 있을 것으로 예상하여 복잡도를 최대한 줄일 수 있도록 제안하는 기법에서는 첫 번째 반복 복호과정에서  $L_{l,k}^1$  만을 업데이트한 후  $|L_{0,k}^1 + R_{0,k}^0|$ 를 이용하여 조기 종료 판별을 수행하고  $t = 2, 3, \dots, I_m$  번째 반복 복호과정에서는  $|L_{0,k}^t + R_{0,k}^{t-1}|$ 를 이용하여 조기 종료 판별을 수행한다. 제안하는 기법의 복호과정을 의사 코드 (pseudo-code)로 나타내면 그림 8과 같다. 제안하는 기법에서 ET-BP 복호 부분의 평균 반복 복호 횟수를  $I_u$ 라고 할 때 복호에 요구되는 복잡도와 지연시간은 표 1과 같이 나타낼

표 1. 제안하는 기법의 복잡도와 지연시간  
Table 1. Complexity and latency of the proposed scheme

Complexity	$O\left(N \log_2 N + 2(I_u - 1) \frac{N}{C} \log_2 \frac{N}{C}\right)$
Latency	$O\left(N \left(1 - \frac{1}{C}\right) + 2(I_u - 0.5) \log_2 \frac{N}{C}\right)$

SC decoding from  $\hat{u}_0$  to  $\hat{u}_{\frac{N}{C}-1}$

Initialization:  $\left(\frac{N}{C} \leq k \leq N-1, 0 \leq l \leq \log_2 \frac{N}{C}\right)$

If  $\left(l = \log_2 \frac{N}{C}\right)$

$$L_{l, \log_2 \frac{N}{C}}^0 = L_{l, \log_2 \frac{N}{C}}$$

Else if  $(l = 0) \& (k \in I_c)$

$$R_{0,k}^0 = \infty$$

Else

$$L_{l,k}^0 = R_{l,k}^0 = 0$$

End if

$t = 1$

ET-BP Decoding

While  $(t \leq I_m)$

If  $(t = 1)$

Update  $L_{l,k}^t$  based on (6)

$t = t + 1$

Else

Update  $R_{l,k}^{t-1}, L_{l,k}^t$  based on (6)

$t = t + 1$

End if

If  $(\min(|L_{0,k}^t + R_{0,k}^{t-1}|) \geq T)$

While end

If  $L_{0,k}^t + R_{0,k}^{t-1} \geq 0$

$$\hat{u}_k = 0$$

Else

$$\hat{u}_k = 1$$

End if

그림 8. 제안하는 기법의 의사 코드

Fig. 8. Pseudo code of the proposed scheme

수 있다.

#### IV. 전산 실험 결과

제안하는 기법의 성능을 확인하기 위한 전산실험에 사용된 파라미터는 표 2와 같다. 가우시안 근사화 기법 기반의 극 부호 설계의 경우  $\eta$ 에 따라 특정 신호 대 잡음 비 영역에서의 성능이 달라진다. 본 논문에서는 성능 비교를 위해 고려한 모든 경우에 대해 비트 오류율  $10^{-5}$  영역에서 최적의 성능을 보이는  $\eta$ 를 찾아 설계

표 2. 전산실험 파라미터  
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Channel model	AWGN channel
Frame size, $N$	256, 512, 1024
Code design method	Gaussian approximation
Code rate, $R$	3/4, 1/2, 1/4
Modulation	BPSK

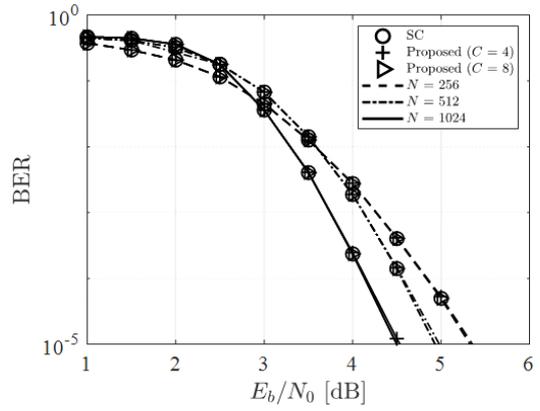
표 3.  $N$ 과  $R$ 에 따른  $\eta$   
Table 3.  $\eta$  for  $N$  and  $R$

$N$	256			512			1024		
$R$	3/4	1/2	1/4	3/4	1/2	1/4	3/4	1/2	1/4
$\eta$	5	4	4	5	4	4	4	3	3

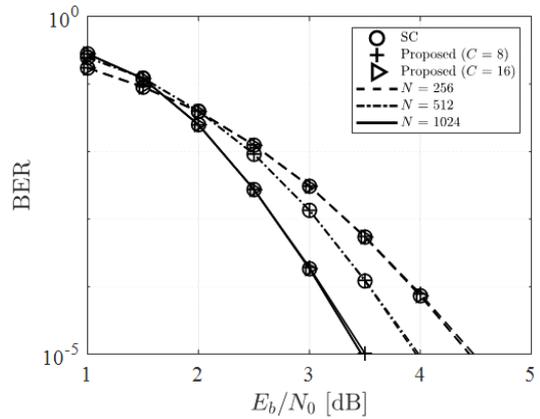
하였으며 전산실험에 사용한  $\eta$ 는 표 3과 같다. 제안하는 기법에서 SC 복호 기법의 복호 성능을 유지하며 복잡도 증가를 최소화할 수 있는  $C$ 와  $I_m$ 을 찾기 위해 다양한  $C$ 와  $I_m$ 쌍  $[C, I_m]$ 에 대한 성능을 확인하였으며, 각  $C$ 마다 비트 오류  $10^{-5}$  영역에서 SC 복호 기법대비 성능 열화가 0.05 dB 이내인 경우 중 최소  $I_m$ 을 갖는 쌍들을 표 4에 나타내었다.  $[C, I_m]$ 을 찾을 때 제안하는 기법의 복잡도 증가를 제한하기 위하여  $I_m$ 은 최대 '4'까지 고려하였다. 표 4에 나타난  $[C, I_m]$ 을 사용하였을 때 제안하는 기법의 성능을 확인하였으며 그 결과는 그림 9와 같다. 그림 9에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안하는 기법에서 표 4에 나타난  $[C, I_m]$ 를 사용할 경우 SC 복호 기법과 비트 오류 성능이 유사함을 확인할 수 있다. 표 4에 나타난  $[C, I_m]$  중  $I_m = 1$ 인 경우에 대해서는 한 번의 반복 복호로 복호가 종료됨으로 조기 종료 판별을 위한 비교 연산이 필요하지 않으며  $I_m = 2$ 인 경우에 대해서는 총  $N/C$  만큼의 비교 연산이 요구된다. 표 4에서  $I_m = 1$ 인 경우  $I_u = 1$ 이며  $I_m = 2$ 인 경우들의 신호 대 잡음 비별  $I_u$ 는 그림 10과

표 4.  $N$ 과  $R$ 에 따른  $[C, I_m]$   
Table 4.  $[C, I_m]$  for  $N$  and  $R$

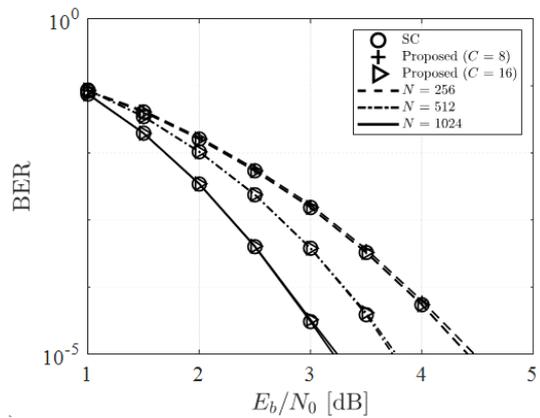
$N \backslash R$	256	512	1024
3/4	[4,2], [8,1]	[4,2], [8,1]	[4,2], [8,1]
1/2	[8,1]	[8,2], [16,1]	[8,2], [16,1]
1/4	[8,2], [16,1]	[16,2]	[16,2]



(a)  $R = 3/4$



(b)  $R = 1/2$



(c)  $R = 1/4$

그림 9. SC 복호 기법과 제안하는 기법의 비트 오류 성능 ( $R = 3/4, 1/2, 1/4$ )

Fig. 9. BER performances of the proposed scheme with various  $C$  for  $R$  of 3/4, 1/2 and 1/4

같다. 그림 10에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안하는

기법이 비트 오류  $10^{-5}$ 를 달성하는 지점에서 대부분의  $I_a$ 가 '1'에 근접하는 것을 확인할 수 있다.

표 5에는 비트 오류  $10^{-5}$ 에서의  $I_a$ 와 SC 복호 기법 대비 제안하는 기법의 복호 복잡도 증감률  $P_c$  및 지연 시간 증감률  $P_l$ 을 나타내었으며 고려한 경우마다 사용한  $T$ 도 같이 나타내었다. 여기에서  $T$ 는 1부터 1씩 증가시키며 비트 오류 성능을 확인하였을 때  $10^{-5}$ 영역에서 SC 복호 기법대비 성능 열화가 0.05dB 이내인 최소값이다. 표 5에서 확인할 수 있는 바와 같이  $P_c$ 가 0.5%

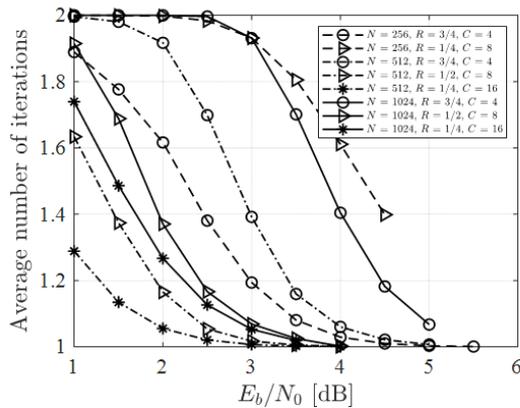


그림 10. 제안하는 기법의 평균 반복 복호 횟수  
Fig. 10. Average number of iterations for the proposed scheme

표 5. 제안하는 기법의 설정값에 따른  $I_a$ 와  $P_c, P_l$   
Table 5.  $I_a, P_c$  and  $P_l$  based on the settings of the proposed scheme

$N$	$R$	$[C, I_m]$	$T$	$I_a$	$P_c$	$P_l$
256	3/4	[4,2]	3	1.002	0.1%	-22.7%
		[8,1]	-	1	0%	-10.6%
	1/2	[8,1]	-	1	0%	-10.6%
		1/4	[8,2]	7	1.411	6.4%
	[16,1]		-	1	0%	-4.7%
512	3/4	[4,2]	3	1.008	0.3%	-23.6%
		[8,1]	-	1	0%	-11.3%
	1/2	[8,2]	3	1.002	0%	-11.3%
		[16,1]	-	1	0%	-5.3%
	1/4	[16,2]	3	1.002	0%	-5.3%
1024	3/4	[4,2]	5	1.175	7%	-24%
		[8,1]	-	1	0%	-11.8%
	1/2	[8,2]	4	1.025	0.4%	-11.8%
		[16,1]	-	1	0%	-5.7%
	1/4	[16,2]	5	1.038	0.3%	-5.6%

미만인 경우 제안하는 기법을 사용함으로써 SC 복호 기법대비 복호 지연시간을 최소 4.7%에서 최대 23.6%만큼 줄일 수 있다. 또한, 제안하는 기법에서  $P_c$ 를 고려하지 않는 경우 더 많은 지연시간을 감소시킬 수 있으며 고려한 모든  $N$ 에 대해 부호율이 높아질수록 제안하는 기법을 통한 지연시간 감소율이 크다.

### V. 결 론

본 논문에서는 극 부호 SC 복호 시 후반부 비트에 대해서 SC 복호 기법으로 계산된 비교적 신뢰도가 높은 로그 우도 비를 활용하여 ET-BP 복호를 수행하는 기법을 제안하였다. 제안하는 기법을 통해 극 부호에 대한 SC 복호 기법대비 성능 열화 및 복잡도 증가 없이 지연시간을 감소시킬 수 있다.

### References

- [1] E. Arıkan, "Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051-3073, Jul. 2009. (<https://doi.org/10.1109/tit.2009.2021379>)
- [2] E. Arıkan, "Polar codes: A pipelined implementation," in *Proc. Int. Symp. Broad. Commun. (ISBC)*, pp. 11-14, 2010. ([http://kilyos.ee.bilkent.edu.tr/~arikan/isbc\\_2010.pdf](http://kilyos.ee.bilkent.edu.tr/~arikan/isbc_2010.pdf))
- [3] B. Yuan and K. K. Parhi, "Early stopping criteria for energy-efficient low-latency belief-propagation polar code decoders," in *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 24, pp. 6496-6506, Dec. 2014. (<https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2366712>)
- [4] S. Sun, S.-G. Cho, and Z. Zhang, "Post-processing methods for improving coding gain in belief propagation decoding of polar codes," *GLOBECOM 2017*, pp. 1-6, 2017. (<https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254247>)
- [5] M. Qin, J. Guo, A. Bhatia, A. G. i Fàbregas, and P. H. Siegel, "Polar code constructions based on LLR evolution," in *IEEE Commun.*

*Lett.*, vol. 21, no. 6, pp. 1221-1224, Jun. 2017  
(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2656126>)

[6] S. H. Song, S. C. Lim, and H. C. Park, "Introduction to the design methods and performance evaluation of 5g new radio (NR) polar codes," *J. KICS*, vol. 43, no. 7, pp. 1065-1073, 2018.

(<https://doi.org/10.7840/kics.2018.43.7.1065>)

[7] H. Li and J. Yuan, "A practical construction method for polar codes in AWGN channels," in *TENCON Spring Conf.*, pp. 223-226, Sydney, NSW, Apr. 2013.

(<https://doi.org/10.1109/TENCONSpring.2013.6584444>)

[8] S. Y. Choi, "Reducing decoding complexity of polar codes," Master's Thesis, Chungnam National University, 2023.

(<http://cnu.dcollection.net/common/orgView/20000656760>)

#### 이 충 수 (Chungsu Lee)



2022년 2월 : 충남대학교 전과정  
보통신공학과 학사

2022년 3월~현재 : 충남대학교  
전과정보통신공학과 석사과  
정

<관심분야> 통신시스템 설계 및  
구현, 디지털 통신

[ORCID:0009-0001-3281-360X]

#### 박 찬 수 (Chansoo Park)



2023년 2월 : 충남대학교 전과정  
보통신공학과 학사

2023년 3월~현재 : 충남대학교  
전과정보통신공학과 석사과  
정

<관심분야> 통신시스템 설계 및  
구현, 디지털 통신

[ORCID:0009-0009-2044-2336]

#### 최 수 용 (Suyong Choi)



2021년 2월 : 충남대학교 정보통  
신공학과 학사

2023년 2월 : 충남대학교 전과정  
보통신공학과 석사

<관심분야> 통신시스템 설계 및  
구현, 디지털 통신

[ORCID:0000-0003-4515-8904]

#### 오 왕 록 (Wangrok Oh)



1994년 2월 : 포항공과대학교 학  
사

1997년 2월 : 포항공과대학교 석  
사

2003년 8월 : 포항공과대학교 박  
사

1997년~2000년 : 포항공과대학

교 정보통신연구소 전임연구원

2003년~2006년 : 포항공과대학교 정보통신연구소 전  
임연구원

2006년~2010년 : 충남대학교 정보통신공학과 조교수

2010년~2015년 : 충남대학교 정보통신공학과 부교수

2015년~현재 : 충남대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야> 통신시스템 설계 및 구현, 오류정정부호,  
MIMO 시스템

[ORCID:0000-0001-8205-5432]