

# RBD 프로토그래프 구조 및 및 부분 삼각 리프팅을 활용한 다중 다이버시티 접근 LDPC 부호 설계에 관한 연구

김찬기, 김재화\*

전북대학교, \*한국전자통신연구원

carisis@jbnu.ac.kr, \*woghk9307@etri.re.kr

## A Study on the design of multi-level diversity-approaching LDPC codes using resolvable balanced design and triangular partial lifting

Chanki Kim, Jaewha Kim\*

Jeonbuk National Univ., \*Electronics and Telecommunications Research Institute

### 요약

본 논문은 LDPC 복호 과정에서 다이버시티 접근을 위한 프리코딩 연산을 동시에 수행하기 위한 프로토그래프 LDPC 부호의 구조를 새로 제안한다. 제안된 LDPC 부호의 프로토그래프는 기존 다이버시티 획득 LDPC 부호에서 사용되었던 계산 형태 및 resolvable balanced design (RBD) 형태를 삼각 부분 리프팅을 통해 보다 확장하여 설계하였으며, 프레임 오류율 및 평균 반복 수 성능 측면에서 제안 구조는 기존 RBD 기반 LDPC 부호보다 우수한 성능임을 실험적으로 보였다.

### I. 서론

다이버시티 접근 LDPC 부호는 기존 통신시스템에서 분리된 다이버시티 획득 연산 및 LDPC 부호의 연산을 통일된 채널 부호의 구조 및 복호기 동작의 설계 변경을 통해 구현하는 기법이다. 기존 시스템에서 해당 역할을 수행하는 프리코딩 및 채널 코딩이 많은 연산량 및 지연을 소모하는 만큼, 제안 기법을 통해 물리층의 동작을 단순화할 수 있어, 차세대 통신 시스템이 요구하는 저지연 요건을 만족하는 주요 요소기술로 활용될 수 있다. 그러나 보다 많은 안테나와 다이버시티를 활용하여 주파수 효율성을 높이려는 추세를 고려해 볼 때 이와 같은 기술을 보다 현실화하기 위해서는 LDPC 부호의 다이버시티 접근성이 다수의 다이버시티 및 페이딩 블록 수에도 대응할 수 있어야 하며 및 다양한 부호율 및 변동하는 채널 환경에 유연하게 다이버시티를 확보할 수 있어야 한다.

프로토그래프를 통한 LDPC 부호 설계에서는, 임의의 페이딩 블록 수  $L$ 에 대해, 다이버시티를 달성할 수 있는 부호율  $R = \frac{1}{L}$  root LDPC 부호 및  $R = \frac{L-1}{L}$  GRP LDPC 부호가 알려져 있으며 [1-3], 최근에는 resolvable balanced design (RBD) 설계에 착안한 프로토그래프 형태를 활용하여 보다 다양한 부호율인  $R = \frac{L-2}{L}$  및  $R = \frac{L-3}{L}$ 에서 다이버시티 접근 성능을 얻을 수 있는 LDPC 부호가 제안되었다 [4]. 이러한 부호 설계 구조는 다이버시티 획득을 전제로하는 매우 구조적인 형태로 제안되었으나, 역으로 해당 성질을 유지하면서도 프로토그래프 구조를 변형할 수 있는 폭이 적다는 단점이 있다. 이로 인해, 기존 부호화 이득의 확보 및 BP 복호기의 평균 반복 수 감소와 복호기의 효율성을 극대화하기 위해 프로토그래프 LDPC 부호 설계에서 주로 활용되었던 밀도 진화 혹은 EXIT에 기반한 최적화가 한정적으로 적용되는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존 알려진 다이버시티 접근이 가능한 RBD를 활용한 프로토그래프의 형태로부터, GRP LDPC 구조에서 활용되었던, 삼각 행렬의 형태의 부분 리프팅 방법을 새로 제안한다. 새로 제안된 방법을 활용

하는 경우, 기존 RBD 구조에서 획득 가능한 부호율에서의 다이버시티 성질을 유지하면서도 기존 부호 대비 부호화 이득 및 평균 반복수에 대한 이득을 확보할 수 있었다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 본론은 우선 제안하는 블록 페이딩이 존재하는 시스템 모델 및 LDPC 부호화된 구조에 대해 설명한다. 이후 제안 GRP LDPC 부호 설계를 통해, 기존 RBD로부터 부분 리프팅을 통해 확장된 프로토그래프를 제안하는 방법을 제안한다 마지막으로, 제안 부호가 기존 RBD로 설계된 LDPC 부호와 대비하여 같은 다이버시티를 얻으면서도 추가적인 부호화 이득 및 획득하는 성능을 나타냄을 보인다.

### II. 본론

#### 1. 시스템 모델

우선 부호 길이가  $N$ 인 프로토그래프 LDPC 부호를 가정한다. 또한 채널은  $L$ 개의 페이딩 블록이 있으며 각 블록 단위로 페이딩이 적용된다. 해당 논문에서 다루는 RBD 기반의 LDPC 부호는 부호율이  $R = \frac{L-2}{L}$  혹은  $R = \frac{L-3}{L}$ 로서 해당 프로토그래프는 양수  $b$ 에 대해  $2b \times Lb$  혹은  $3b \times Lb$ 의 크기로 다음과 같이 표현된다.

$$B = [B_1, B_2, \dots, B_L]$$

여기서 각 프로토그래프의 서브 행렬은 리프팅 후 패리티검사행렬이 생성될 경우, 페이딩 블록에 적용되는 서브 행렬에 해당한다. 이와 같이  $N$  길이의 이진 벡터를 따르는 부호어는 다음과 같이 표현된다.

$$c = (c^{(1)}, c^{(2)}, \dots, c^{(L)})$$

전달된 부호어로부터, 수신자로부터 수신 벡터  $r$ 을 받는 과정에서 다음과 같이 연산된다.

$$r_{i,j} = a_i(2c_{i,j} - 1) + n_{i,j}$$

여기서  $a_i$ 는 페이딩 계수로 여기서는  $E(a_i^2) = 1$ 인 레일리 페이딩만을

가정하며,  $n_{i,j}$ 는 가산성 백색 가우시안 잡음으로서 신호 대 잡음비에 해당하는  $E_b/N_0$ 에 대해  $n_{i,j} \sim n(0, \frac{1}{E_b/N_0})$ 의 가우시안 분포를 따른다. 수신된 값은 연관정된 LLR 값을 바탕으로 LDPC 부호의 신뢰 전파 복호기를 거치며, 이 때, BP 복호기는 최대 반복 수인  $l_{max}$  이하로 동작 하되, 반복 중 신드롬 벡터가 영벡터인 경우 해당 반복 수에서 멈추게 된다. 또한 복호된 비트가 본래 전달된 부호어와 비교하여 모두 일치하지 않는 경우 프레임 오류로 판정한다. 다음 장에서는 이와 같은, 해당 구조에서 다이버시티를 획득할 수 있는 부호를 제안하고자 한다.

## 2. 제안 프로토타입 확장 방법

해당 논문에서 제안된 방법은 다음과 같다. 우선 [4]에서 알려진 RBD에서 착안한 인접 행렬을 기반으로 프로토타입을 설계한다. 그림 1은  $L=6$ 이며 부호율이  $R=\frac{4}{6}$ 이며 Balanced Tournament design을 puncturing하여 활용하여 만들어진 예시이다.

	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	
$B$	1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0	1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0	0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0	0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0	0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0	0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1	0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0

그림 1  $L=6$  및  $R=\frac{4}{6}$ 에서 RBD 형태 프로토타입 예시

양의 정수  $b$ 에 대해, 생성된 프로토타입의 첫 번째 서브행렬인  $B_1$ 인 각 행렬의 원소가 1 혹은 0을  $b \times b$  이진 행렬로 리프팅하며, 0의 경우는 영행렬인  $O$ , 1의 경우는 대각 성분이 1인 상삼각행렬 혹은 하삼각행렬을 이용한다. 또한 두 번째 서브행렬  $B_2$ 에 대해서는 첫 번째와 대부분 같게 리프팅 하되, 대각 성분이 1인 경우, 첫 번째 서브행렬 중 같은 행에서 리프팅된 상삼각 혹은 하삼각행렬로부터 각 행을 아래나 위 방향으로 순환 쉬프트하여 생성한다. 그림 2는 앞서 설명한 생성 방법을 구체적인 값이 부여된 예시로서 설명한 그림이다.

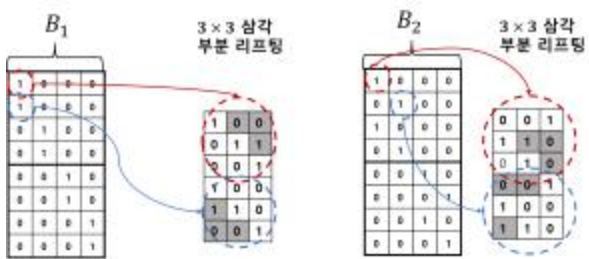


그림 2 제안 프로토타입으로부터  $b=3$  크기의 삼각 부분 리프팅 적용 예시

위와 같은 작업을 모든  $L$ 개의 서브행렬에 반복함으로써 기존 프로토타입 대비  $b$ 배 확장된 프로토타입 생성할 수 있다. 다음 장에서는 해당 방법으로 설계한 프로토타입이 기존 프로토타입보다 나은 부호화 이득 및 적은 수의 반복수를 보임을 보이고자 한다.

## 3. 시뮬레이션 환경 및 성능 측정 결과

시뮬레이션은 다음과 같이 수행되었다. 비교할 RBD 프로토타입은 그림 1과 같이  $8 \times 24$  크기의 행렬로 설계하였으며, 그림 2와 같이  $b=3$

크기 및 주어진 값의 상삼각 및 하삼각 행렬을 이용하여  $24 \times 72$  크기로 확장된 형태로 생성하였다. 실험은  $l_{max} = 100$  크기이며, 복호기는 채널 정보를 모두 알고 있다는 가정하여 레일리 페이딩 계수를 활용한 BP 연산을 이용하였다. 부호 길이는 17,208 [bit]로, 각 페이딩 블록 당 길이는 2,868 [bit]이며, 측정된 실험 결과는 그림 3과 같다.

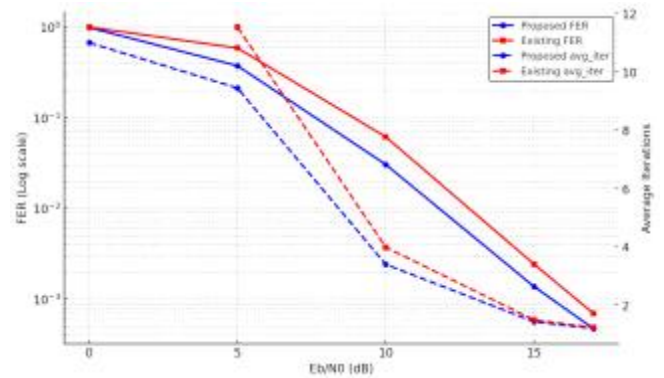


그림 3 기존 및 제안 프로토타입 LDPC 부호의 프레임 오류율 및 평균 반복 수성능 측정 결과

그림 3의 결과에 비추어 볼 때, 제안된 부호가 더 적은 프레임 오류율 및 반복수를 지니고 있음을 확인하였으며, 따라서 이러한 확장을 통해 기존 대비 더 좋은 성능을 보이는 LDPC 부호의 프로토타입을 설계할 수 있다는 점을 알 수 있었다.

## III. 결론

본 논문에서는 LDPC 복호 과정에서 기존 RBD로 설계된 프로토타입 LDPC 대비 우수한 성능을 보이는 조합을 포함하는 보다 일반적인 형태의 프로토타입을 제안하였으며, 이는 기존 프로토타입으로부터 삼각 부분 확장을 통해 얻을 수 있었다. 차기 연구에서는 해당 연구를 이론적 분석을 통해 좋은 부호화 성능을 얻을 수 있는 최적화 방법을 제안하고자 한다.

## ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부와 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업의 연구결과로 수행되었음 (2022-0-01067)

## 참고 문헌

- [1] J. J. Boutros, A. G. I. Fabregas, E. Biglieri, and G. Zemor, "Low-density parity-check codes for nonergodic block-fading channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 9, Sep. 2010, pp.4286-4300.
- [2] Y. Fang, G. Bi, and Y. L. Guan, "Design and analysis of root-protograph LDPC codes for non-ergodic block-fading channels," *IEEE Trans. Wire. Commun.*, vol. 14, no. 2, Feb. 2015, pp.738-749.
- [3] C. Kim, S.-H. Kim, and J.-S. No, "New GRP LDPC codes for H-ARQ-IR over the block fading channel," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol. 68, No. 11, Nov. 2020, pp. 6642-6656.
- [4] J. Kim, C. Kim, H. Park, and J.-S. No, "Design of protograph LDPC codes using resolvable block designs for block fading channel," *IEEE Wire. Comm. Lett.*, Vol. 11, No. 9, Sep. 2022.