

레이트 매칭 방법 수정을 통한 5G NR PBCH 데이터 성능 개선 기법

백성열*, 박찬수*, 오왕록^o

Improving Performance of 5G NR PBCH by the Altering Rate Matching Scheme

Sungyeol Back*, Chansoo Park*, Wangrok Oh^o

요약

5G NR (new radio) 시스템의 기지국은 PBCH (physical broadcast channel)를 통해 부반송파 간격, DMRS 심볼 위치 등을 포함한 MIB (master information block)를 주기적으로 전송한다. 단말의 초기 접속에 필요한 주요 정보를 담고 있는 MIB는 극 부호 (polar code)로 부호화된 후 레이트 매칭 (rate-matching) 과정을 거쳐 PBCH에 할당된 부반송파에 매핑되어 전송된다. 본 논문에서는 레이트 매칭 과정에서 반복된 부호 비트들이 매핑되는 주파수 간격을 늘려 주파수 다이버시티 이득을 개선하는 방안을 제안한다. 제안하는 기법은 추가적인 복잡도 증가 없이 PBCH 수신 성능을 개선할 수 있는 장점이 있다.

Key Words : 5G NR, PBCH, Rate-Matching, Frequency Diversity

ABSTRACT

In 5G new radio (NR) system, base stations transmit MIB (master information block) which contains important information for user equipments (UEs) including subcarrier spacing and locations of DMRS symbols with physical broadcast channel (PBCH). The MIB which is crucial for UE's initial access is encoded with polar code and then rate-matched before being mapped onto subcarriers for PBCH. In this paper, we propose simple modification on rate-matching which could improve receiving performance of PBCH by increasing frequency diversity. The proposed scheme improves block error rate performance of PBCH reception without any additional complexity.

1. 서론

5G NR (new radio) 시스템에서 기지국은 무선 커버리지 (coverage) 내에 위치한 모든 단말의 초기 접속을 위해 시간 영역에서 4개의 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 심볼과 주파수 영역에서

240개의 부반송파 (subcarrier)로 구성된 SSB (synchronization signal block)를 전송한다^[1,2]. SSB는 신호의 동기화 및 셀 인덱스 (cell index)를 획득하기 위한 PSS (primary synchronization signal), SSS (Secondary synchronization signal)와 채널 추정을 위해 사용되는 DMRS (demodulation reference signal) 위치, 부반송

* First Author : Dept.of Information Communications Eng., Chungnam National University, syback@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, 학생회원

논문번호 : 202404-059-B-RN, Received April 2, 2024; Revised May 17, 2024; Accepted May 29, 2024

과 간격 (SCS, subcarrier spacing) 등을 포함한 MIB (master information block)을 획득하기 위한 PBCH (physical broadcast channel)로 구성된다³⁾.

PBCH는 QPSK (quadrature phase shift keying) 심볼로 변조 (modulation)된 PBCH 데이터와 DMRS로 구성되어 있으며 이때 PBCH 데이터는 SSB 내의 부반송파에 순차적으로 매핑되며 DMRS는 PBCH 내에 4개의 부반송파 간격마다 매핑된다. PBCH 데이터는 MIB를 길이가 512인 극 부호 (polar code)로 부호화한 후 서브 블록 인터리빙 (sub-block interleaving)을 수행하고 이 중 일부 부호 비트를 반복하는 레이트 매칭 (rate-matching) 과정을 통해 생성된다. 따라서 수신기에서는 PBCH 데이터의 수신 성능을 개선하기 위해 반복된 부호 비트들에 대한 수신 신호들을 결합한 후 극 부호 복호 (decoding)을 수행하여 MIB를 추출할 수 있다.

PBCH 데이터를 생성하는데 사용되는 레이트 매칭 과정에서는 서브 블록 인터리빙 된 코드 워드 (codeword)의 앞 부분에 해당하는 352개의 부호 비트가 반복된다. 해당 기법을 통해 생성된 PBCH 데이터가 SSB 내의 부반송파에 매핑될 경우 반복으로 인해 생성된 두 개의 동일 비트가 매핑된 부반송파 간 주파수 간격이 좁아 다이버시티 (diversity) 이득을 크게 얻지 못하는 문제가 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 기존 레이트 매칭 방법을 유지한 상태에서 주파수 다이버시티를 얻기 위해 새로운 PBCH 데이터의 부반송파 매핑 기법이 제안되었다⁴⁾. 해당 기법에서는 레이트 매칭된 비트들을 순차적으로 부반송파에 매핑하는 대신 주파수 다이버시티를 최대화하기 위한 별도의 매핑 테이블을 사용한다. 따라서 PBCH 데이터의 부반송파 매핑에 필요한 인덱스 집합을 저장할 메모리와 해당 메모리를 읽는 과정이 추가로 필요하다. 한편, PBCH 데이터의 수신 성능을 개선하기 위해 레이트 매칭 과정에서 극 부호어 내 중간에 위치한 부호 비트들을 반복하는 기법이 제안되었다¹⁰⁾. 해당 기법에서는 극 부호의 부호 이

득을 극대화할 수 있는 반복 패턴을 제안하였으나 반복된 부호 비트들이 매핑된 부반송파 간 간격이 좁아 주파수 다이버시티를 극대화하는 데는 한계가 있다.

본 논문에서는 레이트 매칭 방법을 수정하여 PBCH 데이터의 성능을 개선하기 위한 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 레이트 매칭을 수행하기 위한 원형 버퍼 (circular buffer) 구조를 유지한 상태에서 부호 비트를 반복하는 시작점을 수정하여 PBCH 데이터를 생성한다. 이때 생성된 데이터는 SSB 내의 부반송파에 순차적으로 매핑되어 추가적인 복잡도 증가 없이 주파수 다이버시티를 획득하여 성능을 개선할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 시스템 모델을 기술하고 3장에서 제안하는 레이트 매칭 기법을 설명한다. 4장에서는 제안하는 기법의 성능을 확인하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

5G NR 시스템에서 단말의 무선 초기 접속을 위해 사용되는 PBCH 데이터를 생성하는 과정은 그림 1과 같다. 부반송파 간격과 DMRS 위치 등을 포함한 32개의 비트로 구성된 MIB에 길이 24인 CRC (cyclic redundancy check)를 덧붙여 벡터 (vector) \mathbf{b} 를 생성한다. 해당 벡터는 인터리빙 (interleaving) 되어 $\hat{\mathbf{b}}$ 로 변환된 후 길이가 $N=512$ 인 극 부호 부호기의 입력 벡터 \mathbf{u} 의 일부 원소 (element)에 정보 비트 (information bit)로 할당된다. 벡터 \mathbf{u} 는 5G NR 극 부호 부호기를 통해 식 (1)과 같이 부호어 \mathbf{c} 를 생성하며 식 (1)에서 \mathbf{G}_N 은 하삼각 정방 행렬 $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ & 1 \end{bmatrix}$ 의 $n = \log_2 N$ 차 크로네커 곱셈 (kronecker operation) 연산 \otimes 을 통해 식 (2)와 같이 구할 수 있다⁸⁾.

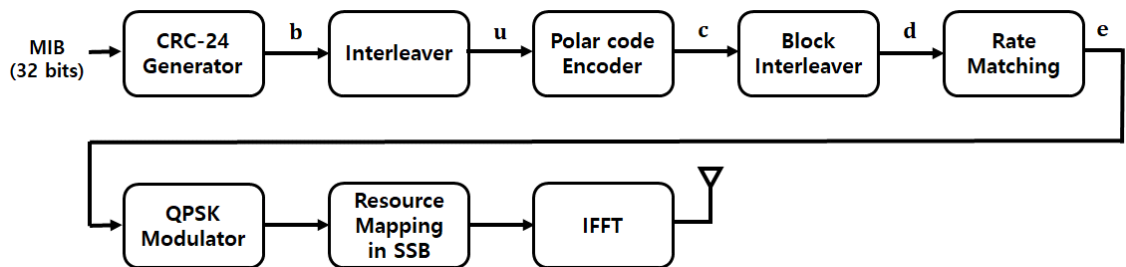


그림 1. PBCH 데이터 생성 과정
Fig. 1. Process of generating PBCH data.

$$\mathbf{c} = \mathbf{u}\mathbf{G}_N. \quad (1)$$

$$\mathbf{G}_N = \mathbf{F}^{\otimes n}. \quad (2)$$

극 부호어 \mathbf{c} 는 16개의 부호 비트로 이루어진 32개의 서브 블록으로 나누어진 다음 그림 2와 같은 방법으로 서브 블록 인터리빙을 통해 벡터 $\mathbf{d} = [d_0, d_1, \dots, d_{N-1}]$ 를 생성한다. 그림 3은 레이트 매칭을 수행하기 위한 원형 버퍼를 나타내며 해당 버퍼에 \mathbf{d} 의 원소들을 저장한 후 d_0 를 기준으로 순차적으로 해당 버퍼의 데이터를 읽어와 식 (3)과 같이 길이가 864인 벡터 \mathbf{e} 를 생성한다. 여기서 \mathbf{d}_i^j 는 \mathbf{d} 의 i 번째부터 j 번째까지 원소로 이루어진 서브 벡터 (sub-vector)를 나타낸다. 레이트 매칭을 통해 생성된 \mathbf{e} 는 432개의 QPSK 심볼로 변조되어 SSB 내 PBCH에 할당된 부반송파에 순차적으로 매핑된다.

$$\mathbf{e} = [\mathbf{d}, \mathbf{d}_0^{351}]. \quad (3)$$

단말은 수신한 SSB에서 PBCH 데이터를 추출한 후 반복된 부호 비트들에 대한 수신 신호 결합을 수행하고 극 부호 복호기의 입력값으로 사용된다. 5G NR 표준에 제안된 레이트 매칭과 PBCH 데이터의 부반송파 매핑 방법을 따를 경우 반복된 부호 비트 쌍들은 각각 부반송파 간격의 5배에 해당하는 주파수 간격을 두고 배치되어 상관 대역폭 (coherence bandwidth)이 해당 주파수 간격보다 클 경우 주파수 다이버시티를 극대화하지 못한다. 이를 개선하기 위해 [4]에서 반복된 부호 비트의 부반송파 간 주파수 간격을 최대화하기 위한 새로운 부반송파 매핑 기법이 제안되었다. 해당 기법은 5G NR 표준에 제시된 원형 버퍼를 그대로 두고 PBCH 데이터를 부반송파에 매핑하는 방법을 수정하여 주파수 다이버시티를 증대시키는 기법을 제안하였으나 PBCH 데이터가 부반송파에 순차적으로 매핑되지 않아 부반송

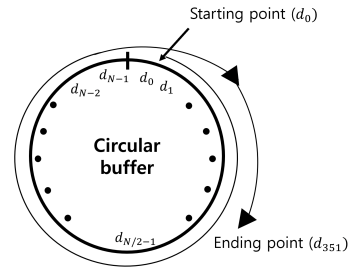


그림 3. 원형 버퍼 구조
Fig. 3. Circular buffer structure.

파 매핑 테이블과 메모리 읽기 동작이 추가로 필요하다.

III. 제안하는 기법

5G NR 시스템의 PBCH 데이터 생성에 사용되는 레이트 매칭과 부반송파 매핑 기법을 사용할 경우 반복된 모든 부호 비트 쌍들은 SSB 내에서 부반송파 간격 f_{sc} 의 5배에 해당하는 주파수 간격을 두고 배치되어 무선 채널의 상관 대역폭이 $5f_{sc}$ 보다 큰 경우 주파수 다이버시티 획득이 어려운 문제가 있다. 본 논문에서는 복잡도 증가 없이 레이트 매칭 방법을 수정하여 PBCH 데이터의 복호 성능을 극대화하는 기법을 제안한다.

그림 2와 같이 서브 블록 인터리빙된 \mathbf{d} 는 레이트 매칭을 위해 그림 3과 같이 원형 버퍼에 저장된다. 해당 버퍼에서 식 (4)와 같이 인덱스 K 에 해당하는 부호 비트부터 연속된 864개의 부호 비트를 읽어와 벡터 \mathbf{e} 를 생성하며 여기서 $((\cdot))_N$ 은 modulo- N 연산을 나타낸다. 제안하는 구조는 원형 버퍼에 저장되어있는 $d_{((K))_N}$ 부터 864개의 부호 비트들을 순차적으로 읽어내는 구조이므로 읽어낼 비트 인덱스 생성에 필요한 구현 복잡도는 기존 기법과 동일하다. 생성된 \mathbf{e} 는 QPSK 심볼로 변조된 후 SSB 내의 PBCH에 할당된 부반송파에 순차적으로

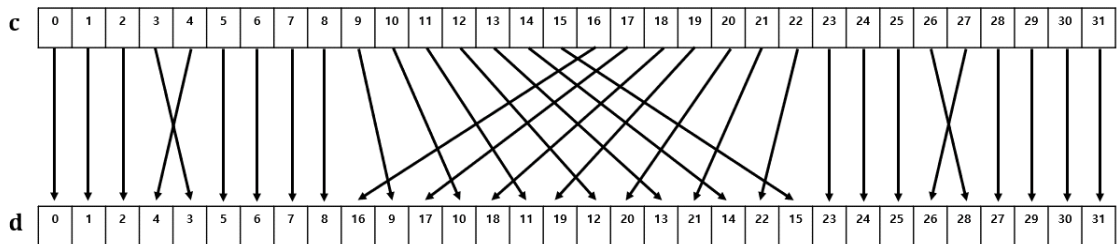


그림 2. PBCH 데이터의 서브 블록 인터리빙 수행 과정
Fig. 2. Process of performing sub-block interleaving of PBCH data.

$$\mathbf{e} = [d_{((K))_N}, d_{((K+1))_N}, \dots, d_{((K+N-1))_N}, d_{((K))_N}, d_{((K+1))_N}, \dots, d_{((K+351))_N}], \quad (4)$$

$$K \in \{0, 1, \dots, N-1\}$$

매핑되어 단말로 전송된다. 이때 전송된 신호는 다중 경로 페이딩 채널 (Multipath fading channel)를 통과하여 RMS (root mean square) 지연 확산 (delay spread) σ_τ 에 따라 결정되는 상관 대역폭에 의해 복호 성능이 달라질 수 있다.

5G 시스템은 중심 주파수 (center frequency) f_c 가 6 GHz 미만인 경우 f_{sc} 로 15, 30 kHz를 사용할 수 있다^[5]. 3GPP (Third generation partnership project)에서 제안한 5G 무선 채널 환경은 표 1과 같이 σ_τ 에 따라 다양한 상관 대역폭을 갖는 채널로 모델링될 수 있다. 부반송파 간격으로 정규화 (normalization)된 상관 대역폭 B_c 는 식 (5)와 같이 σ_τ 와 f_{sc} 를 이용하여 계산할 수 있으며 부반송파 간격으로 정규화된 SSB가 차지하는 대역폭은 240이다^[6,7].

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau f_{sc}}. \quad (5)$$

표 1에서 $B_c \geq 240$ 인 경우 SSB가 전송되는 대역폭보다 상관 대역폭이 더 넓어 레이트 매칭 방법을 수정하더라도 추가적인 주파수 다이버시티 획득이 어려우나 σ_τ 가 100, 300 ns인 경우 K 를 최적화하여 SSB 내의 반복된 부호 비트들이 매핑된 부반송파 간 주파수 간격을 넓혀 추가적인 주파수 다이버시티 획득이 가능하다.

벡터 $\mathbf{e} = [e_0, e_1, \dots, e_{863}]$ 내에 포함된 원소들은 SSB 내에 정해진 부반송파 위치에 매핑되며 이 중 반복된 부호 비트 쌍에 해당하는 e_l 과 e_{l+N} , $l \in \{0, 1, \dots, 351\}$ 의 부반송파 간 주파수 간격 D_l 를 계산하여 벡터 $\mathbf{D} = [D_0, D_1, \dots, D_{351}]$ 를 도출할 수 있다. 이를 활용하여 식 (4)의 K 에 따른 \mathbf{D} 의 누적 분포 변화를 확인하기

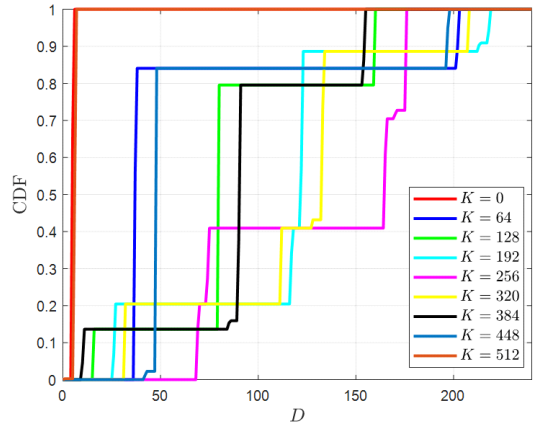


그림 4. 레이트 매칭 인덱스에 따른 반복된 부호 비트 간의 부반송파 간격의 누적 분포
Fig. 4. CDFs of subcarrier spacings between repeated coded bits versus D .

위해 $K = 64i$, $i = 0, 1, \dots, 8$ 인 경우에 대한 \mathbf{D} 의 누적 분포를 확인하였으며 그 결과는 그림 4와 같다. 여기에서 $K=0$ 인 경우는 5G PBCH 채널에서 사용되는 레이트 매칭 기법에 해당되며 이때 \mathbf{D} 내에 포함된 모든 원소는 5로 동일하다. 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 K 에 따라 \mathbf{D} 의 누적 분포가 크게 달라지며 K 값의 최적화를 통해 주파수 다이버시티를 극대화하여 PBCH 수신 성능을 개선할 수 있다. 예를 들어 5G 시스템이 “Long delay spread” 채널에서 동작하여 상관 대역폭이 $44f_{sc}$, $f_{sc} = 15$ kHz인 경우 $K = 256$ 으로 설정하여 레이트 매칭을 수행한다면 그림 4에서 볼 수 있듯이 모든 반복된 부호 비트 쌍들 간 부반송파 간격이 해당 채널의 상관 대역폭보다 넓어 주파수 다이버시티를 충분히 획득할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 그림 3의 원형 버퍼 구조를 유지한 상태에서 최적의 K 를 선택하여 추가적인 복잡도 증가 없이 PBCH 데이터의 성능을 개선할 수 있다.

표 1. 5G 무선 채널 환경별 RMS 지연 확산 및 정규화된 상관 대역폭
Table 1. RMS delay spread and normalized coherence bandwidth of 5G channel model.

Model	σ_τ (ns)	B_c	
		$f_{sc} = 15$ kHz	$f_{sc} = 30$ kHz
Very short delay spread	10	1333	667
Short delay spread	30	444	222
Nominal spread	100	133	67
Long delay spread	300	44	22

IV. 전산 실험 결과

제안하는 기법의 성능을 확인하기 위해 전산 실험에 사용된 파라미터는 표 2와 같으며 PSS와 SSS를 통해 시간 및 주파수 동기화 및 셀 인덱스는 정확히 검출됐다고 가정하였다.

채널 추정 및 보상 기법으로는 PBCH 내에 4개의 부반송파마다 위치한 DMRS를 이용하여 LS (least square) 기법을 사용한 후 인접한 2개의 채널 추정값을 선형 보간 (linear interpolation) 및 선형 외간 (linear extrapolation)하여 추정 및 보상하는 것을 가정하였다¹⁴. 복호화 기법으로는 복호 경로의 개수 L 을 유지한 상태에서 사후 확률 (posterior probability)이 가장 높은 경로로 복호화를 수행한 후 CRC 검사를 통해 정보 비트들을 결정하는 CA-SCL (CRC-aided successive cancellation list) 기법을 사용하였다^{8,9)}.

정규화된 상관 대역폭 B_c 가 각각 50, 200인 TDL-A 채널에서 식 (4)와 같이 $K=64i, i=0,1,\dots,8$ 인 경우에 대한 레이트 매칭을 수행하여 블록 오류율 (block error rate, BLER)이 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 을 달성하는 영역에서 성능을 확인하였으며 그 결과는 그림 5와 같다. 이때 $K=0$ 인 경우는 기존 PBCH 데이터의 레이트 매칭 기법을 나타낸다. 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 고려하는 모든 B_c 에 대해 $K=256$ 으로 설정하여 레이트 매칭을 수행할 경우 주파수 다이버시티를 극대화할 수 있으며 해당 결과는 그림 4를 통해 예측할 수 있는 결과와 일치한다.

그림 6은 TDL-A 채널에서 단말의 이동 속도 v 가 30 km/h일 때 σ_r 가 10, 30, 100, 300 ns인 경우에 대해 [4]에 제안된 부반송파 매핑 기법과 $K=256$ 을 사용한 제안하는 기법의 블록 오류율 성능을 나타낸 것이다. 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 σ_r 가 10, 30 ns인 경우 B_c 가 SSB가 전송되는 대역폭보다 넓거나 유사하여 고려하는 모든 기법이 추가적인 주파수 다이버시티

표 2. 전산실험 파라미터
Table 2. Simulation parameters.

Parameters	Values
Carrier frequency	4 GHz
Subcarrier spacing	30 kHz
Channel model	TDL-A, B, C ^[6]
Channel Estimation	LS
Decoding method	CA-SCL ^[9]
List size (L)	8

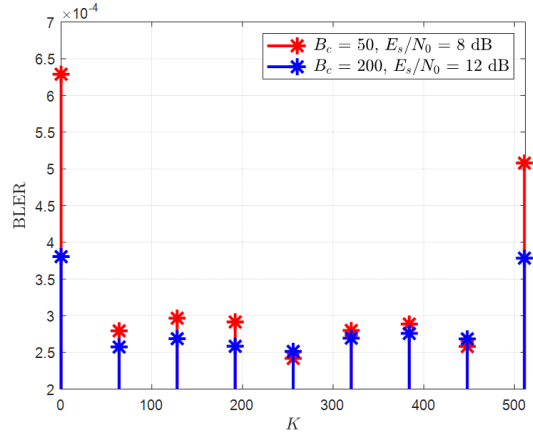


그림 5. K 에 따른 제안하는 기법의 BLER.
Fig. 5. BLER of the proposed scheme under K .

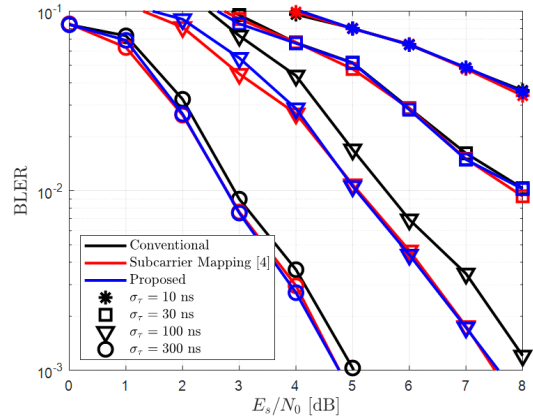


그림 6. RMS 지연 확산에 따른 제안하는 기법의 BLER ($v=30\text{km/h}$)
Fig. 6. BLER performance of proposed scheme under RMS delay spread.

이득을 얻기 어려우나 σ_r 가 100, 300 ns인 경우 제안하는 기법은 블록 오류율이 10^{-3} 을 달성하는 영역에서 기존 기법 대비 각각 약 0.5, 0.25 dB의 성능 이득을 얻을 수 있다. 제안하는 기법은 고려하는 모든 σ_r 에서 부반송파 매핑 테이블 구현에 필요한 메모리 및 메모리 읽기 과정이 추가적으로 필요한 [4]와 달리 추가적인 복잡도 없이 성능 개선을 얻을 수 있다.

그림 7-9는 TDL-A, B, C 채널에서 표 3에 나타난 환경에 대해 $K=256$ 을 사용한 제안하는 기법의 성능을 나타낸 것이다. 그림 7-9를 통해 블록 오류율 10^{-3} 영역에서 제안하는 기법의 성능 이득을 표 4에 나타내었다. 표 4에서 볼 수 있는 바와 같이 제안하는 기법은 기존 기법 대비 고려하는 모든 TDL 채널과 Case에서

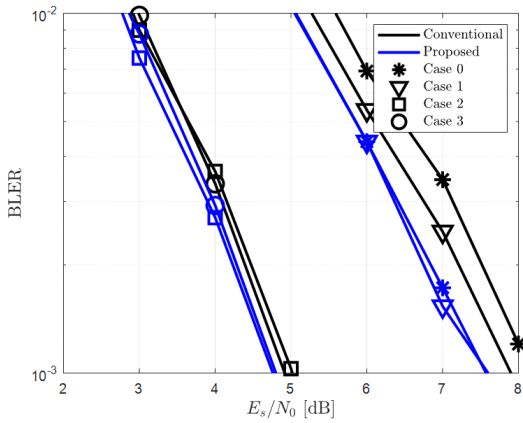


그림 7. TDL-A에 따른 제안하는 기법의 BLER
Fig. 7. BLER performance of proposed scheme under TDL-A.

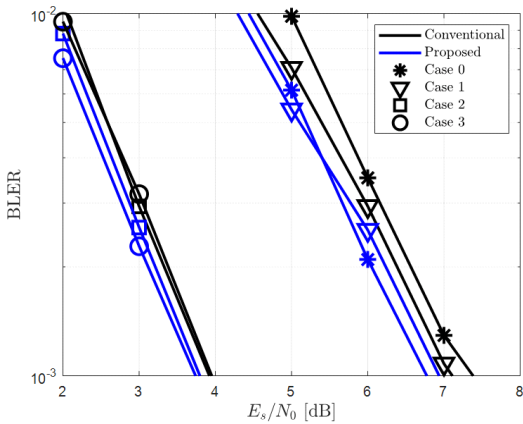


그림 8. TDL-B에 따른 제안하는 기법의 BLER
Fig. 8. BLER performance of proposed scheme under TDL-B.

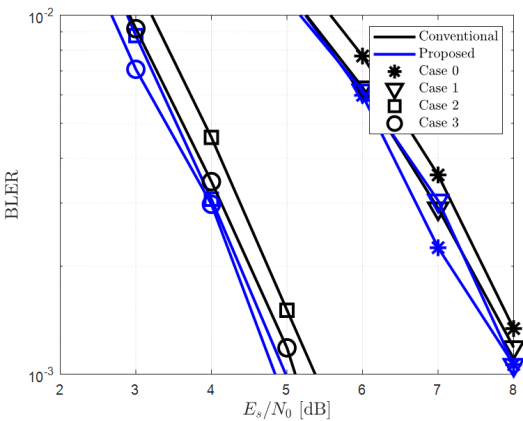


그림 9. TDL-C에 따른 제안하는 기법의 BLER
Fig. 9. BLER performance of proposed scheme under TDL-C.

표 3. Case에 따른 σ_r 와 v
Table 3. σ_r 와 v under Case.

Case	Parameters	
	σ_r (ns)	v (km/h)
0	100	30
1	100	100
2	300	30
3	300	100

표 4. TDL 채널과 Case에 따른 제안하는 기법의 성능 이득
Table 4. Performance gain of proposed scheme under TDL channel and Case.

Case	PBCH performance gain (BLER = 10^{-3})		
	TDL-A	TDL-B	TDL-C
0	0.5 dB	0.55 dB	0.3 dB
1	0.3 dB	0.15 dB	0.2 dB
2	0.25 dB	0.13 dB	0.4 dB
3	0.1 dB	0.2 dB	0.25 dB

성능 개선이 있으며 TDL-A, B, C에 따라 각각 최대 약 0.5, 0.55 및 0.4 dB의 성능 이득을 얻을 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 PBCH 데이터를 생성하는 과정에서 일부 부호 비트들의 반복 위치를 수정하여 추가적인 복잡도 증가 없이 주파수 다이버시티를 증대할 수 있는 레이트 매칭 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 부호 비트의 반복 위치에 따라 반복된 부호 비트 쌍들이 매핑된 부분송파 간 주파수 간격의 누적 분포를 도출한 후 무선 채널 환경의 상관 대역폭에 따라 최적의 부호 비트의 반복 위치를 선택할 수 있다. 제안하는 기법은 원형 버퍼 구조를 유지한 상태로 레이트 매칭을 수행하며 이에 따라 추가적인 복잡도 증가 없이 성능을 극대화할 수 있다.

References

[1] S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskar, and M. Frenne, "NR: The new 5G radio access technology," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 1, pp. 24-30, Dec. 2017. (<https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2017.1700>)

042)

[2] 3GPP TS 38.104 v15.6.0, “*NR Base station(BS) radio transmission and reception (release 15)*,” Jun. 2019. (https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138104/15.05.00_60/ts_138104v150500p.pdf)

[3] 3GPP TS 38.211 v16.2.0, “*Physical channels and modulation(release 16)*,” Jun. 2019. (https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/16.02.00_60/ts_138211v160200p.pdf)

[4] J. Kim, S. Back, S. Choi, and W. Oh, “Improving decoding performance of 5G NR PBCH by the altering subcarrier mapping scheme,” *J. KICS*, vol. 46, no. 10, pp. 1572-1577, 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.10.1572>)

[5] Z. Lin, J. Li, Y. Zheng, N. V. Irukulapati, H. Wang, and H. Sahlin, “SS/PBCH block design in 5G new radio (NR),” *2018 IEEE GC Wkshps*, pp. 1-6, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018. (<https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2018.8644466>)

[6] 3GPP TR 38.901 v14.3.0 “*5G Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100GHz*” (https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/14.03.00_60/tr_138901v140300p.pdf)

[7] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and practice*, 2nd Ed., Prentice Hall, Dec. 2013. (<https://telkom2013.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/02/wireless-comm-princip-n-practice-theodoresrappaport.pdf>)

[8] V. Bioglio, C. Condo, and I. Land, “Design of polar codes in 5G new radio,” in *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 23, no. 1, pp. 29-40, Firstquarter 2021. (<https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2967127>)

[9] K. Niu and K. Chen, “CRC-aided decoding of polar codes,” in *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16,

no. 10, pp. 1668-1671, Oct. 2012. (<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2012.090312.121501>)

[10] S. Back, J. Kim, S. Choi, C. Lee, and W. Oh, “Decoding performance improvement of 5G PBCH by altering rate matching,” in *Proc. Symp. KICS*, Kangwon, Feb. 2022.

백 성 열 (Sungyeol Back)



2020년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 학사

2022년 2월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사

2023년 9월~현재 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 통신시스템 설계 및 구현, 디지털 통신
[ORCID:0000-0001-6161-5904]

박 찬 수 (Chansoo Park)



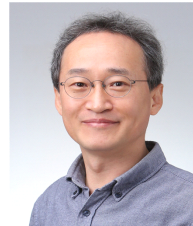
2023년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 학사

2023년 3월~현재 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정

<관심분야> 통신시스템 설계 및 구현, 디지털 통신

[ORCID:0009-0009-2044-2336]

오 왕 록 (Wangrok Oh)



1994년 2월 : 포항공과대학교 학사

1997년 2월 : 포항공과대학교 석사

2003년 8월 : 포항공과대학교 박사

1997년~2000년 : 포항공과대학교 정보통신연구소 전임연구원

2003년~2006년 : 포항공과대학교 정보통신연구소 전임연구원

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]