

Polar 부호화 SCMA를 위한 순차적 다중사용자 검출 기법

라 동 준*, 최 권 휴^o

Successive Multiuser Detection for Polar Coded SCMA

Dongjun Na*, Kwonhue Choi^o

요 약

Sparse code multiple access(SCMA)는 무선 채널의 송신 용량을 증가시키기 위해 제안된 Non-orthogonal multiple access(NOMA) 기법의 일종이며, 기존의 4세대와 5세대의 Orthogonal frequency division multiple access(OFDMA) 기법에 비해 매우 높은 스펙트럼 효율을 달성하여 최근 주목받고 있다. 한편, SCMA의 다중사용자 검출 성능 향상을 위해 다양한 채널 부호와 SCMA의 조합이 연구되고 있으며, 채널 부호의 복호화과정과 SCMA의 다중사용자 검출과정을 결합하여 수행하는 결합형 다중사용자 검출 기법이 연구된 바 있다. 본 논문에서는 결합형 검출과정의 Tanner graph 구조에서 SCMA 검출과정과 채널 부호의 복호화과정을 사용자별로 세분화하고, 사용자별로 순차적으로 검출을 수행하는 결합형 검출과정을 제안한다. 수렴된 BER 성능을 얻기 위해 많은 수의 반복횟수를 요구하는 기존의 검출기법에 비해 제안하는 기법은 작은 수의 반복횟수만으로 BER 성능이 수렴되므로 검출기의 복잡도를 개선할 수 있다.

Key Words : Polar code, Channel code, SCMA, Multiple access, Multi-user detection

ABSTRACT

Sparse code multiple access(SCMA) is a non-orthogonal multiple access(NOMA) scheme which is proposed to increase the transmission capacity of a wireless channel. Recently, SCMA has attracted attention because it achieves a very high spectral efficiency compared to the orthogonal frequency division multiple access(OFDMA) scheme in 4G and 5G communications. On the other hand, the combination of various channel codes and SCMA has been studied to improve the multi-user detection performance of SCMA, and a joint multi-user detection scheme that combines the decoding of channel codes and the multi-user detection process of SCMA has been studied. In this paper, we propose a new joint detection process in which the SCMA detection and the channel code decoding process are segmented by user in the tanner graph of the joint detection process, and the detection is performed sequentially by user. Compared to the conventional joint detector that requires a large number of iterations to obtain the optimal BER performance, the proposed scheme can improve the complexity of the detector by achieving the BER performance convergence with only a small number of iterations.

※ 이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2018R1D1A3A03000837)

※ 본 논문은 교육부 및 한국연구재단의 BK21-플러스 사업(ICT기반 스마트기기 창의인재양성사업팀)의 지원을 받아 수행 되었습니다(22A20130012814)

• First Author : Yeungnam University Dept. of Information Communications Engineering, nadj2964@ynu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Yeungnam University Dept. of Information Communications Engineering, gonew@ynu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202001-018-A-RN, Received January 25, 2020; Revised March 23, 2020; Accepted April 22, 2020

I. 서 론

차세대 무선 통신 네트워크는 증가하는 트래픽량에 따라 지속적으로 보다 높은 서비스 품질, 빠른 전송 속도, 낮은 지연시간 등을 요구하고 있다. 최근 이러한 요구에 따라, Non-orthogonal multiple access(NOMA) 기법이 주목 받고 있다. 그 중 Sparse code multiple access(SCMA)는 높은 스펙트럼 효율과 대규모 접속 지원이 가능하여 많은 관심을 받고 있는 기법이다¹⁻⁵⁾. SCMA는 주파수 도메인 NOMA 기법으로, 향상된 Low density spreading code division multiple access(LDS-CDMA) 기법의 일종이다. SCMA는 기존의 Orthogonal frequency division multiple access(OFDMA) 기반의 다중 접속 기법에 비해 이론적으로 약 3배의 접속 지원이 가능하다⁴⁻⁵⁾. 대부분의 NOMA 기법에서는 비직교 신호를 검출하기 위해 수신기의 복잡도가 증가하는 문제가 있다. SCMA는 희소성(Sparsity)을 이용한 메시지 전달 알고리즘(Message passing algorithm: MPA)를 이용하여 검출 과정의 복잡도를 낮추었다⁶⁾.

무선 통신의 물리 계층에서, 스펙트럼 효율을 증가시키고 서비스 품질을 보장할 수 있는 대표적인 방법 중 하나는 채널 코딩이다. 예를 들어, Turbo 부호는 3세대와 4세대 통신 표준에서 가장 주요한 채널 코드이며, 강력한 오류 정정 기능과 유연성을 가진다. LDPC 부호는 빠른 복호화 과정을 가지는 장점을 가지고 있어 5세대 통신 표준화 작업에서 Turbo 부호와 비교되어지는 채널 코드이다. 마지막으로 본 논문에서 다룰 polar 부호는 가장 최신의 채널 코드 중 하나이다. Polar 부호는 LDPC 부호나 Turbo 부호에 비해서 짧은 블록 길이에 대하여 우수한 오류 정정 능력을 갖기 때문에 5세대 통신의 다운링크 컨트를 채널에 채택되었다⁷⁾.

기존에 채널 부호화 SCMA 신호를 효율적으로 검출하기 위해 여러 기법들이 연구되어 왔다. 기존의 기법들은 다음과 같이 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 방법으로, 채널 디코딩과정과 데이터 검출을 순차적으로 진행하는 방법이 있다⁸⁾. 이 방법에서는 SCMA 검출과정을 모두 완료한 후, 검출 결과를 다음 과정인 채널 복호화과정에 입력으로 사용할 수 있도록 재구성한다. 그 다음 복호화과정을 수행한다. 그리고 전체 과정을 여러 번 반복하여 송신 데이터를 추정한다. 두 번째 방법으로는 SCMA 검출과정과 채널 복호화과정을 결합하여 수행하는 방법이 있다^{9,10)}. 이 방법에서, 한 번의 반복 과정은 다음과 같다. SCMA

검출 과정을 두 부분, 즉 함수 노드(function node) 갱신과정과 변수 노드(variable node) 갱신과정으로 나누고 함수 노드 갱신만 먼저 수행한다. 그리고 함수 노드 갱신의 결과를 채널 복호화과정에 사용할 수 있도록 재구성한다. 그 다음 채널 복호화과정을 수행하고, 복호화과정의 결과를 변수 노드 갱신에 사용할 수 있도록 재구성한 후, 변수 노드 갱신을 수행한다. 그리고 전체 과정을 충분히 반복하여 송신 데이터를 추정한다. 두 번째 방법에서는, 변수 노드를 갱신할 때 채널 복호화과정의 오류 정정 기능의 도움을 받을 있으므로 첫 번째 방법에 비해 성능 이득을 얻을 수 있다^{9,10)}.

채널 부호화 SCMA 신호를 복조하기 위해, 반복적인 검출과 복호화과정이 필요하다. 이 검출과정은 반복과정에 의해 신뢰할만한 추정 데이터를 얻기 위해서는 계산량이 증가하는 단점이 있다. 결합형 검출 및 복호화기법에서는 순차적인 방법에 비해 더 적은 반복횟수에서 수렴된 Bit error rate(BER) 성능 달성이 가능하고, 수렴된 BER 성능 자체도 개선되었다^{9,10)}. 하지만, 수렴된 BER 성능을 달성하기 위해 여전히 많은 반복(5회)을 요구하므로 복잡도가 낮지 않다. 본 논문에서는 복잡도를 더욱 낮추기 위한 새로운 결합형 검출 및 디코딩 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 SCMA의 tanner graph의 구조에서 결합형 검출 및 복호화과정을 사용자별로 세분화한다. 그리고 사용자별로 차례대로 검출과정을 수행한다. 모든 사용자의 검출과정이 끝나면 한 번의 반복 과정을 완료하게 된다. 제안하는 기법에서는 사용자별로 차례대로 검출하므로 앞의 순서에 갱신된 사용자의 검출 결과가 다음 반복 과정이 아닌 현재 반복 과정 내에서 다른 사용자의 검출 및 복호화과정에 즉각적으로 쓰인다. 실험 결과에서, 제안하는 기법은 기존의 결합형 검출 및 복호화 방법에 비해 검출 작은 반복횟수에서도 수렴된 BER 성능을 달성하며, 이를 통해 제안하는 기법은 수렴된 BER 성능을 달성하기 위한 계산량을 기존의 결합형 검출 기법에 비해 약 43% ~ 66% 수준으로 경감시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

II. 기존의 polar 부호화 SCMA 신호의 결합형 검출기법

2.1 Polar 부호화 SCMA의 시스템 모델

그림 1은 상향링크 polar 부호화 SCMA의 시스템 모델을 나타낸다¹⁰⁾. 그림 1에서, $\mathbf{u}_i^i = \{u_{i,1}^i, u_{i,2}^i, \dots, u_{i,m}^i\}$

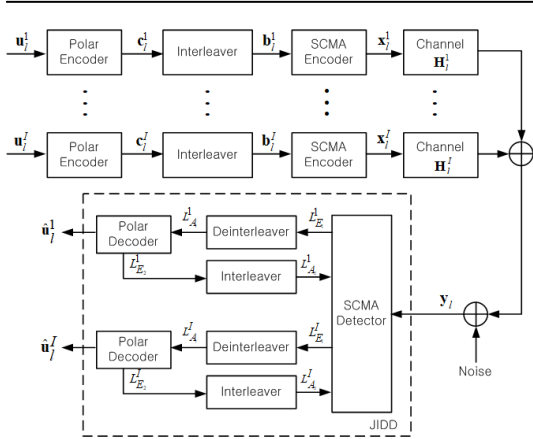


그림 1. 상향링크 polar 부호화 SCMA의 시스템 모델
Fig. 1. System model for uplink polar coded SCMA

는 l 번째 데이터 블록에서 사용자 i 의 데이터 비트열을 나타내고, $1 \leq i \leq I$ 이다. i 번째 사용자의 l 번째 데이터 비트열은 polar 부호기에 입력되며, 출력은 $\mathbf{c}_i^l = \{c_{i,1}^l, c_{i,2}^l, \dots, c_{i,N}^l\}$ 로 나타낼 수 있다. $\mathbf{b}_i^l = \{b_{i,1}^l, b_{i,2}^l, \dots, b_{i,N}^l\}$ 은 부호화된 비트열의 랜덤 인터리빙 수행결과이다. SCMA 변조 심벌 수가 M 일 때, \mathbf{b}_i^l 의 각 비트는 $Q = \log_2(M)$ 개씩 J -차원의 복소 코드워드 $\mathbf{x}_i^l = \{x_{i,1}^l, x_{i,2}^l, \dots, x_{i,J}^l\}$ 로 맵핑된다. 따라서 전체 SCMA 코드워드의 길이 L 은 N/Q 이다. I 명의 사용자가 각각 J -차원의 복소 코드를 사용하므로, SCMA의 과부하 인자(overloading factor) λ 는 I/J 이다.

SCMA에서 코드워드는 J 개의 직교자원에 확산되어 전송된다. SCMA의 코드워드에는 0과 0이 아닌 요소가 포함되어 있는데 이는 각각 직교자원의 사용 유무를 뜻한다. 그림 2는 변수 노드의 수는 6이고 함수 노드의 수는 4인 SCMA의 인자 그래프(factor graph)를 나타낸다. 일반적으로, 변수 노드는 사용자를 나타내고, 함수 노드는 직교자원을 나타낸다. 그림 2의 인자 그래프는 아래와 같이 $J \times I$ 행렬로 표현할 수 있다.



그림 2. 변수 노드 수가 6이고 함수 노드 수가 4인 SCMA의 인자 그래프(factor graph) 예시
Fig. 2. An example of factor graph of SCMA with 6 variable nodes and 4 function nodes

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

상향링크 시스템에서, l 번째 데이터 블록에서 i 번째 사용자와 기지국 간의 채널 이득 행렬은

$$\mathbf{H}_i^l = \begin{bmatrix} h_{l,1}^i & & & & \\ & h_{l,2}^i & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & & h_{l,J}^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \text{diag}(h_{l,1}^i, h_{l,2}^i, \dots, h_{l,J}^i)$$

으로 나타낼 수 있다. $h_{l,j}^i$ 에서, j 는 직교자원의 인덱스이다. 따라서 l 번째 데이터 블록에 대한 수신신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_l = \sum_{i=1}^I \mathbf{H}_i^l \mathbf{x}_i^l + \mathbf{z}_l, \quad 1 \leq l \leq L \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{x}_i^l = [x_{i,1}^l, x_{i,2}^l, \dots, x_{i,J}^l]^T$ 는 i 번째 사용자 l 번째 코드워드를 나타내고, $\mathbf{y}_l = [y_{l,1}, y_{l,2}, \dots, y_{l,J}]^T$ 로 표현할 수 있다. 그리고 $\mathbf{z}_l = [z_{l,1}, z_{l,2}, \dots, z_{l,J}]^T$ 는 $CN(0, N_0 \mathbf{I})$ 의 분포를 따르는 부가백색잡음을 나타낸다. 일반적으로, 수신기에서는 반복적인 SCMA 신호 검출과정을 완료한 후, 반복적인 polar 복호화과정을 수행하여 최종 복조 데이터를 얻는다. 본 논문에서는 이러한 복조 방법을 분리형 검출기법으로 표기한다.

2.2 Joint iterative detection scheme

분리형 검출 기법의 경우, SCMA의 검출과정과 polar 복호화과정 중의 내부 메시지를 최대한 활용할 수 없기 때문에 최적의 성능을 얻을 수 없다. 그래서 [10]에서는 그림 1의 점선 박스 안에 나타낸 것과 같이 결합형 반복 검출 및 복호화(Joint iterative detection and decoding: JIDD) 기법을 제안하였다. 본 논문에서는 [10]에서 제안한 기법을 결합형 검출기법으로 표기하며, [10]의 결합형 검출기의 구조를 기반으로 순차적인 다중사용자 검출기법을 제안한다. 결합형 검출기법에서는 일반적인 기법과 달리, SCMA 신호 검출과정과 polar 복호화과정을 별개로 수행하지 않고, 두 과정을 결합하여 수행한다. 그림 1에서, $L_{E_i}^l$

은 SCMA 검출기의 출력 메시지이다. $L_{A_2}^i$ 는 $L_{E_1}^i$ 에 대한 디인터리빙 수행 결과이며, Polar 복호기에 입력된다. $L_{E_2}^i$ 는 Polar 복호기의 출력 메시지이다. $L_{A_1}^i$ 은 $L_{E_2}^i$ 에 대한 인터리빙 수행 결과이며, SCMA 검출기에 입력된다. 이와 같이 결합된 전체 과정을 여러 번 반복 수행하여 최종 복조 데이터 $\hat{\mathbf{u}}_1^1, \hat{\mathbf{u}}_1^2, \dots, \hat{\mathbf{u}}_1^L$ 를 얻는다.

그림 3은 [10]에서 제안한 결합형 검출기의 인자 그래프 예시를 나타낸다. 그림 3에서 위쪽 점선 박스는 polar 복호화과정을 나타내고, 아래쪽 점선 박스는 SCMA 검출 과정을 나타낸다. 그리고 두 과정 사이에 메시지를 주고받을 수 있도록 매핑과정이 존재한다. 참고로 매핑과정에는 그림 1에 나타난 인터리빙 과정을 포함한다. 결합형 검출기에서는 다음과 같은 이유로 검출 성능 이득을 얻을 수 있다. 우선, 그림 3의 과정 ①과 과정 ⑥은 각각 함수 노드 갱신과정과 변수 노드 갱신과정이다. 함수 노드 갱신과정은 SCMA 검출결과를 얻기 위한 과정이며, 변수 노드 갱신과정은 다음 반복과정을 위해 검출결과를 이용하여 내부 메시지를 갱신하는 과정이다. 결합형 검출기에서는 함수 노드 갱신과정의 결과 메시지를 곧바로 변수 노드 갱신과정에 입력하지 않고, 그림 3의 과정 ②에서 과정 ⑤에 해당하는 Polar 복호화과정을 수행한 후 변수 노드 갱신을 수행한다. 따라서 결합형 검출기에서는 SCMA의 두 갱신 과정 사이 있는 Polar 복호화과정에 의해 매 반복마다 Polar 부호의 오류 정정 기능에 의한 성능 이득을 얻을 수 있다.

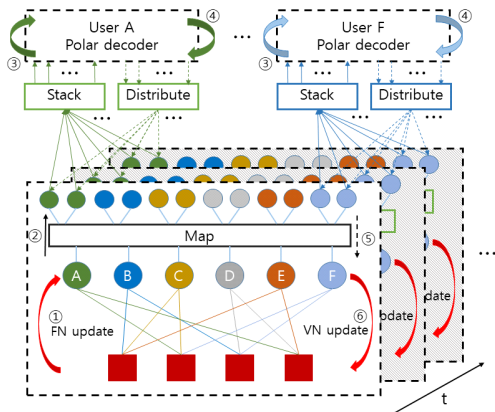


그림 3. 결합형 다중사용자 검출기의 인자 그래프(factor graph) 예시
Fig. 3. An example of factor graph of joint iterative multiuser detector

III. Polar 부호화 SCMA 신호의 순차적 다중사용자 검출기법

본 장에서는 결합형 검출기를 기반으로 하는 순차적 다중사용자 검출기법을 설명한다. 각 변수의 표기는 [10]의 표기법을 따른다.

3.1 순차적 다중사용자 검출기법의 함수 노드 갱신 과정

본 장에서 제안하는 순차적 다중사용자 검출기법은 결합형 검출기를 기반으로 한다. 순차적 다중사용자 검출기법의 기존의 결합형 검출기와와의 차이점은 각 사용자별로 검출을 수행하며, 순차적으로 진행되는 것이다. τ 번째 반복과정에서, 갱신된 함수 노드 f_j 로부터 변수 노드 v_i 에 연결된 내부 메시지는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[10].

$$I_{f_j \rightarrow v_i}^{\tau}(\mathbf{x}_i^l) = \sum_{\mathbf{x}^p, p \in \{S \setminus i\}} \{P(y_{i,j} | \mathbf{x}_i^l, \mathbf{x}^p, p \in \{S \setminus i\}) \cdot I_{v_i \rightarrow f_j}^{\tau}\}, \quad 1 \leq l \leq L. \quad (4)$$

순차적 다중사용자 검출 기법에서, 식 (4)의 $I_{v_i \rightarrow f_j}^{\tau}$ 는 다음과 같이 수정된다.

$$I_{v_i \rightarrow f_j}^{\tau} = \begin{cases} \prod_{p \in \{S \setminus i\}} I_{v_i \rightarrow f_j}^{\tau}(\mathbf{x}_i^p) & \text{if } n_p < n_i, \\ \prod_{p \in \{S \setminus i\}} I_{v_i \rightarrow f_j}^{\tau-1}(\mathbf{x}_i^p) & \text{if } n_p > n_i, \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $n_p, n_i, 1 \leq n_p \leq I, 1 \leq n_i \leq I$ 는 각각 사용자 p 와 사용자 i 의 검출 순번이다. 사용자 i 의 함수 노드 갱신에 필요한 사용자 p 의 내부 메시지 $I_{v_i \rightarrow f_j}^{\tau}$ 는 $n_p < n_i$ 인 경우, 현재 반복과정에서 갱신된 내부 메시지 $I_{v_i \rightarrow f_j}^{\tau}(\mathbf{x}_i^p)$ 를 사용한다. 반면, $n_p > n_i$ 인 경우에는 이전 반복과정 즉, $\tau-1$ 번째 반복과정에서 갱신된 내부 메시지 $I_{v_i \rightarrow f_j}^{\tau-1}(\mathbf{x}_i^p)$ 가 사용된다. 사용자 i 에 대한 함수 노드 갱신과정 완료 후, 갱신된 내부 메시지는 매핑과정에 의해 polar 복호기를 위한 사전 정보 (prior information)로 변환된다. 그리고 이를 이용하여 사용자 i 의 polar 복호화과정을 수행한다. Polar 복호화과정에 의해 갱신된 사용자 i 의 l 번째 심벌의 확률 정보 $P(\mathbf{x}_i^l)$ 는 다음 과정인 변수 노드 갱신에 사용

된다. 결합형 검출기법에서는 SCMA 검출기와 polar 복호기간에 반복적인 내부 메시지 교환이 필요하므로 polar 복호화과정을 위한 soft-input-soft-output(SISO) 알고리즘이 요구된다^{9,10}. 본 논문에서는 [10]에서 제안된 결합형 검출기와 동일하게 soft cancellation (SCAN) 알고리즘을 사용하여 polar 복호화과정을 수행한다.

3.2 순차적 다중사용자 검출기법의 변수 노드 갱신 과정

기존의 결합형 검출 기법과 달리, 순차적 다중사용자 검출기법에서는 한 반복과정 내에서 갱신된 일부 사용자에 대한 내부 메시지와 아직 갱신되지 않은 사용자의 내부 메시지의 규모(scale) 차이가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해, 순차적 다중사용자 검출기법에서는 마지막 단계인 변수 노드 갱신 단계에서, $P(\mathbf{x}_i^l)$ 의 가중치를 조절한다.

기존 결합형 검출 기법에서는 polar 복호화 단계에서 polar 복호화에 의해 갱신된 내부 메시지와 복호화 전의 내부 메시지의 가중치 α 를 조절하여 복호화 결과를 출력한다¹⁰. 순차적 다중사용자 검출기법에서는 복호화 단계에서의 가중치는 사용하지 않는다. 즉, 참고문헌 [10]의 식 (14)에서 $\alpha=0$ 으로 설정하였다. 그리고 τ 번째 반복 과정에서, 갱신된 변수 노드 v_i 로부터 함수 노드 f_j 에 연결된 내부 메시지를 다음과 같이 수정하였다.

$$I_{v_i \rightarrow f_j}^{\tau}(\mathbf{x}_i^l) = P(\mathbf{x}_i^l)^{\beta} \prod_{p \in \{S \setminus j\}} I_{f_p \rightarrow v_i}^{\tau}(\mathbf{x}_i^p), \quad (6)$$

여기서 $P(\mathbf{x}_i^l)$ 는 polar 복호기에 의해 얻은 사용자 i 의 l 번째 심벌의 로그-우도 비율(log-likelihood rate) 값을 확률 도메인 값으로 변환한 값이고 β 는 $P(\mathbf{x}_i^l)$ 의 가중치이다.

3.3 순차적 다중사용자 검출기법의 전체 과정 요약

그림 4는 순차적 다중사용자 검출 기법의 검출 과정을 도식화한 것이다. 그림 4는 사용자 A와 사용자 E가 첫 번째와 두 번째로 검출할 때의 예시이다. 그림 4에서, ①~⑥은 사용자 A의 결합 검출 과정이고, 사용자 A의 검출 과정이 완료되면 사용자 E의 결합 검출 과정 즉, ⑦~⑫를 수행한다. 그림 4를 보면, 사용자 A는 사용자 C, F와 두 번째 직교자원을 공유하고,

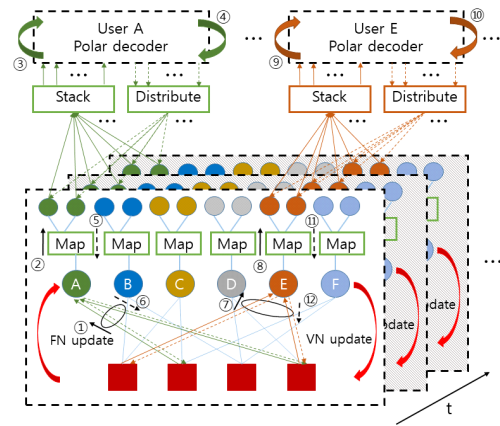


그림 4. 순차적 다중사용자 검출기의 인자 그래프(factor graph) 예시
Fig. 4. An example of factor graph of successive multiuser detector

사용자 D, E와 네 번째 직교자원을 공유한다. 한 사용자의 검출과정을 완료한 후, 그 다음 검출 사용자로 현재의 반복 내에서 갱신된 사용자들과 가장 많이 직교자원을 공유하는 사용자를 다음 순번으로 선택하면 검출 성능 이득을 높일 수 있다.

II장 2절에서 설명한 것과 같이 기존의 결합형 검출기법은 각 과정에서 모든 사용자에 대한 메시지 노드의 갱신을 수행한 후 다음 과정으로 넘어가고, 순차적 다중사용자 검출기법은 사용자별로 메시지 노드를 세분화하여 각 과정에서 한 사용자에 대한 메시지 노드의 갱신만 수행한다. 두 기법 모두 한 번의 검출과정을 완료되면 갱신된 메시지 노드의 수는 동일하므로 두 기법 간에 계산량 차이는 없다. 알고리즘 1은 순차적 다중사용자 검출 기법의 전체 알고리즘을 보인다.

IV. 실험 결과

본 장에서는 기존의 검출기법과 제안하는 순차적 다중사용자 검출 기법의 BER 성능을 비교한다. BER 성능 실험을 위한 공통적인 시스템 변수는 표 1과 같다. 그리고 신호 대 잡음비는 E_b/N_0 로 표기하며, 정확히 전체 M 명의 사용자에 대한 SCMA 변조 신호의 bit 에너지 대 잡음비를 뜻한다.

기존의 검출기법과 제안하는 순차적 다중사용자 검출 기법의 성능을 비교하기 전에, 가중치 파라미터 β 의 값을 최적화 할 필요가 있다. 그림 5는 β 에 따른 순차적인 다중사용자 검출 기법의 BER 성능을 나타

알고리즘 1. Successive Multi-user Detection for Polar coded SCMA

```

1: Initialize:

$$I_{v_i \rightarrow f_j}^0(\mathbf{x}_i^j) = \frac{1}{M}, i = 1, \dots, I, j \in \mathbf{S}_i^v, l = 1, \dots, N/Q$$


$$R_{n,t}^i = 0, t \in A, R_{n,t}^i = \infty, t \in A^c, O_{user} = [AECBDF].$$

2:
3: for  $\tau = 1, 2, \dots, \text{iter\_num}$  do
4:   for  $i = 1 : \text{user\_num}$  do
5:      $I_{user} = O_{user}(i)$ 
6:     for  $l = 1 : N/Q$  do
7:       FNs Update Process for user  $I_{user}$ : (4)=(① or ⑦ in Fig. 4)
8:       (6) to (9) in [10](=② or ⑧ in Fig. 4)
9:     end for
10:
11:     Priori Information Update Process for user  $I_{user}$ :
12:      $\mathbf{L}_0^i = \Pi^{-1}(\mathbf{L}_{e,SCMA}^B(e^i))$ 
13:      $(\mathbf{L}_n^i, \mathbf{R}_n^i) = \text{polar\_decoder}(\mathbf{L}_0^i, \mathbf{R}_n^i)$  (=③ to ④ or ⑨ to ⑩ in Fig. 4)
14:
15:     for  $l = 1 : N/Q$  do
16:       (14) to (16) in [10](=⑤ or ⑪ in Fig. 4)
17:       VNs Update Process for user  $I_{user}$ : (6)=(⑥ or ⑫ in Fig. 4)
18:     end for
19:   end for
20: end for

```

낸다. 그림 5의 범례에서 AWGN은 식 (2)의 \mathbf{H}_l^i 의 모든 대각성분이 1인 채널을 뜻하고, AWGN(Random phase)는 \mathbf{H}_l^i 의 모든 대각 성분에 대해 $|h_{l,j}^i|^2=1$ 이고 각 $h_{l,j}^i$ 의 위상은 $[0, 2\pi]$ 에서 독립적으로 균등분포를 가지는 채널을 뜻한다. 그리고 Rayleigh는 \mathbf{H}_l^i 의 모든 대각성분은 독립적인 레일레이 분포를 따르는 채널을 뜻한다. AWGN 채널의 경우, 0.3~0.6 구간에서 최적 성능을 보이며, AWGN(Random phase) 채널에 경우에는 0.3~0.5 구간에서 최적의 성능을 보인다. 마지막으로 레일레이 채널의 경우, 0.4~0.6 구간에서 최적 성능을 보인다.

표 1. 성능 실험을 위한 시스템 변수
Table 1. System parameter for the performance simulation

System parameter	Value
The number of users I	6
The number of orthogonal resources J	4
Code length N	256
Code rate	1/2

그림 6은 AWGN 채널 환경에서 기존의 결합형 검출 기법과 순차적인 다중사용자 검출 기법의 검출 반복횟수(Iteration)에 따른 BER 성능을 보인다. 기존의 결합형 검출 기법의 가중치 변수 $\alpha=0.7$ 이고^[10], 순차적인 다중사용자 검출 기법의 가중치 파라미터 $\beta=0.4$ 이다. 그림 6에서, 반복횟수가 적을 때 순차적 다중사용자 검출 기법은 기존의 결합형 검출기법에 비해 월

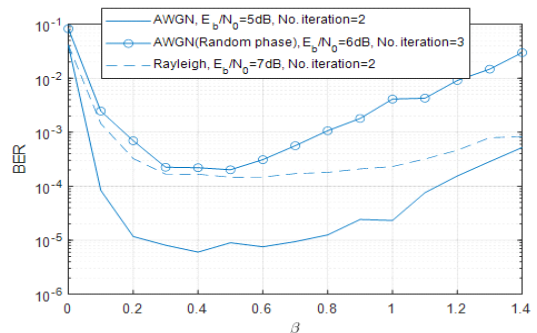


그림 5. β 에 따른 순차적인 다중사용자 검출 기법의 BER 성능
Fig. 5. BER performance of successive multiuser detection scheme according to β

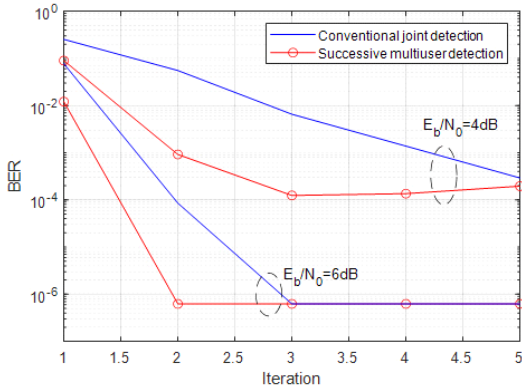


그림 6. 반복횟수에 따른 BER 성능, AWGN channel, $N=256$, Code rate=1/2
 Fig. 6. BER performance according to the number of iteration, AWGN channel, $N=256$, Code rate=1/2

등히 좋은 BER 성능을 달성함을 알 수 있다. 특히, $E_b/N_0=6\text{dB}$ 인 환경에서 순차적 다중사용자 검출 기법은 2번의 반복 만에 수렴된 BER 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 반면, 기존의 결합형 검출 기법은 $E_b/N_0=6\text{dB}$ 일 때, 3번의 반복 만에 수렴된 성능을 보이며, $E_b/N_0=4\text{dB}$ 일 때는 5번의 반복에도 여전히 성능이 수렴하지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 E_b/N_0 가 낮을수록, BER 성능이 수렴하기 위한 제안하는 기법과 기존 기법의 총 계산량 차이가 커짐을 알 수 있다.

그림 7은 AWGN(Random phase) 채널에서의 BER 성능을 보인다. 나머지 파라미터는 그림 6에 대한 실험과 동일하다. 그림 7에서, 순차적 다중사용자 검출 기법의 BER 성능의 수렴속도와 수렴된 BER 성능의 두 가지 측면에서 모두 매우 우월한 것을 확인할 수 있다. 특히 $E_b/N_0=6\text{dB}$ 인 경우, 기존의 결합형 검출 기법은 BER 성능이 약 3×10^{-3} 에서 수렴하는 반면, 순차적 다중사용자 검출기법은 약 2×10^{-5} 에서 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 Rayleigh 채널에서 검출 반복횟수에 따른 BER 성능이다. 순차적인 다중사용자 검출 기법의 가중치 변수 $\beta=0.5$ 이고, 나머지 실험 파라미터는 AWGN 채널에서의 실험과 동일하다. Rayleigh 채널에서도 동일하게 반복횟수가 적을 때 순차적 다중사용자 검출 기법은 기존의 결합형 검출기법에 비해 월등히 좋은 성능을 달성한다. 순차적 다중사용자 검출 기법은 $E_b/N_0=6\text{dB}$ 일 때, 3번에 반복과정만으로 수렴된 BER 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 한편,

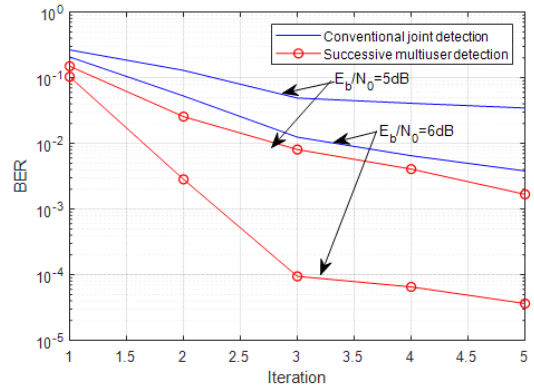


그림 7. 반복횟수에 따른 BER 성능, AWGN(Random phase) channel, $N=256$, Code rate=1/2
 Fig. 7. BER performance according to the number of iteration, AWGN(Random phase) channel, $N=256$, Code rate=1/2

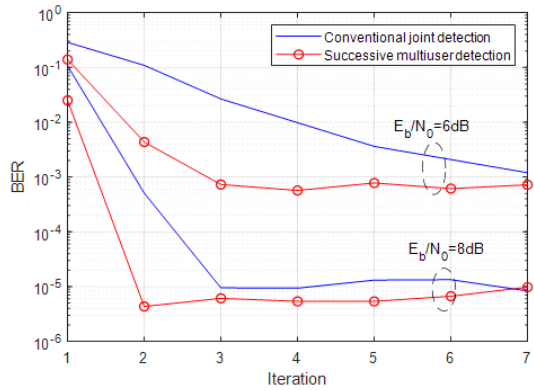


그림 8. 반복횟수에 따른 BER 성능, Rayleigh channel, $N=256$, Code rate=1/2
 Fig. 8. BER performance according to the number of iteration, Rayleigh channel, $N=256$, Code rate=1/2

$E_b/N_0=8\text{dB}$ 인 환경에서는 2번의 반복과정 만에 수렴된 BER 성능을 달성함을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 polar 부호화 SCMA 신호의 결합형 검출기 기반 순차적 다중사용자 검출기법을 제안하였다. 한 사용자 그룹 내에서 모든 사용자에 대한 데이터 검출을 동시에 진행하는 기존의 결합형 검출기법과 달리, 제안하는 순차적 다중사용자 검출기법은 검출기의 tanner graph 구조에서 각 메시지 노드를 사용자별로 세분화하고 다른 사용자의 데이터 검출결과를 최대한 활용할 수 있도록 검출과정을 개선하여 검출 성능을 향상시켰다. 성능 실험결과에서는 순차적 다중

사용자 검출기법의 BER 성능을 기존의 결합형 검출기법과 비교하고, polar 복호화과정의 출력에 대한 가중치 β 의 최적 값을 확인하였다. 순차적 다중사용자 검출기법은 기존 기법에 비해 적은 반복횟수에서도 월등한 BER 성능을 달성하였다. 특히, 사용자간 수신 신호 전력 조절이 완벽하고 수신신호의 위상이 랜덤 균등분포를 가지는 채널에서, 수렴된 BER 성능 또한 기존 기법에 비해 월등함을 확인하였다.

References

[1] G. Kang, H. Kim, Y. Shin, and O. Shin, "Performance analysis of signal detection based on message passing algorithm in uplink sparse code multiple access systems with multiple antennas," *J. KICS*, vol. 43, no. 3, pp. 497-505, Mar. 2018.

[2] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, "A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017.

[3] S. Moon and J. Lee, "Performance study of connectionless access based on SCMA with different spreading sequences for massive IoT access," in *Proc. Symp. KICS*, pp. 595-596, Nov. 2019.

[4] J. Wang, C. Zhang, R. Li, G. Wang, and J. Wang, "Narrow-band scma: A new solution for 5g iot uplink communications," in *Proc. 2016 IEEE 84th VTC-Fall*, pp. 1-5, Sep. 2016.

[5] L. Lu, Y. Chen, W. Guo, H. Yang, Y. Wu, and S. Xing, "Prototype for 5G new air interface technology SCMA and performance evaluation," *China Commun.*, vol. 12, pp. 38-48, Dec. 2015.

[6] A. Bayesteh, H. Nikopour, M. Taherzadeh, H. Baligh, and J. Ma, "Low complexity techniques for SCMA detection" in *Proc. 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1-6, Dec. 2015.

[7] S. Song, S. Lim, and H. 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, Jul. 2018.

[8] Y. Wu, S. Zhang, and Y. Chen, "Iterative multiuser receiver in sparse code multiple access systems," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 2918-2923, Jun. 2015.

[9] Z. Pan, E. Li, L. Wen, J. Lei, and C. Tang, "Joint iterative detection and decoding receiver for polar coded SCMA system," in *Proc. IEEE ICC Wkshps.*, pp. 1-6, May 2018.

[10] Z. Pan, E. Li, L. Zhang, J. Lei, and C. Tang, "Design and optimization of joint iterative detection and decoding receiver for uplink polar coded SCMA system," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52014-52026, Oct. 2018.

라 동 준 (Dongjun Na)



2014년 2월 : 영남대학교 정보통신공학과 졸업
 2016년 2월 : 영남대학교 정보통신공학과 석사
 2016년 3월~현재 : 영남대학교 정보통신공학과 박사과정

<관심분야> OFDM 기반 다중반송파 전송방식, FBMC 기반 다중 반송파 전송방식, 5G 이동통신 시스템, 채널 코드

[ORCID:0000-0002-1656-4113]

최 권 휴 (Kwonhwe Choi)



1994년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업
 1996년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사
 2000년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사
 2000년 4월-2003년 2월 : 한국

전자통신연구원 광대역 무선전송 연구부 광대역 무선전송 연구팀 선임연구원

2003년 2월~현재 : 영남대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> OFDM 기반 다중반송파 전송방식, MIMO 검출 알고리즘, 5G 이동통신 시스템

[ORCID:0000-0002-1755-0186]