

상향링크 SCMA 시스템에서 다중안테나 MPA 신호 검출 기법의 성능 분석

강길모*, 김현민*, 신요안**, 신오순^o

Performance Analysis of Signal Detection Based on Message Passing Algorithm in Uplink Sparse Code Multiple Access Systems With Multiple Antennas

Gil-Mo Kang*, Hyeon Min Kim*, Yoan Shin**, Oh-Soon Shin^o

요약

SCMA (Sparse Code Multiple Access)는 차세대 이동통신의 성능 요소를 만족시킬 수 있는 유망한 비직교 다중접속 방식이다. SCMA는 희소성을 갖는 다차원 코드북 기반으로 Maximum Likelihood (ML) 검출 기법과 유사한 성능을 얻으면서 낮은 복잡도를 갖는 메시지 전달 알고리즘(Message Passing Algorithm: MPA)을 적용하여 다중사용자 신호를 효율적으로 검출할 수 있다. 본 논문에서는 기지국에 다중안테나가 존재하는 상향링크 SCMA 시스템에서 MPA 검출 기법과 가우시안 근사 기반의 MPA 검출 기법의 성능을 분석한다. 안테나 수와 사용자 수 증가에 따른 계산 복잡도를 분석하고, 모의실험을 통해 BER (Bit Error Rate) 성능을 비교·검증한다.

키워드 : 저복잡도 검출, 메시지 전달 알고리즘(MPA), 다중안테나, SCMA, MIMO

Key Words : Low-complexity detection, message passing algorithm (MPA), multiple antennas, sparse code multiple access (SCMA), multiple-input multiple-output (MIMO)

ABSTRACT

Sparse code multiple access (SCMA) is a promising non-orthogonal multiple access (NOMA) technology for next generation communication systems. The sparsity of SCMA codebooks allows the receiver to take advantage of low-complexity signal detection based on message passing algorithm (MPA) with near maximum likelihood performance. In this paper, we investigate the original MPA detection and Gaussian approximation based MPA detection in an uplink SCMA system with multiple antennas at the base station. We analyze and compare the computational complexity of the two schemes in terms of the number of antennas and the number of users. The BER performance is also compared by simulations.

※ 본 연구는 2016년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이고 (2016H1A2A1909700-글로벌 박사양성사업), 또한 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017-0-00724, 셀룰러 기반 산업 자동화 시스템 구축을 위한 5G 성능 한계 극복 저지연, 고신뢰, 초연결 통합 핵심기술 개발).

• First Author : (ORCID:0000-0002-6893-1261)Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, gilmokang@ssu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6984-8240)Soongsil University, School of Electronic Engineering and Department of ICMC Convergence Technology, osshin@ssu.ac.kr, 종신회원

* (ORCID:0000-0002-8943-3675)Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, hminplus@ssu.ac.kr, 학생회원

** (ORCID:0000-0002-4722-6387)Soongsil University, School of Electronic Engineering, yashin@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2018-01-030, Received January 30, 2018; Revised March 4, 2018; Accepted March 16, 2018

I. 서론

최근 IoT (Internet of Things)와 V2X (Vehicle to Everything) 등과 같은 5G 통신 응용 기술이 부각되면서 초연결성(Massive Connectivity), 저지연(Low Latency), 높은 주파수 효율(High Spectral Efficiency)이 차세대 통신 기술의 중요한 성능 요소가 되었다^[1]. 특히 초연결성과 주파수 효율은 매우 밀접한 관계가 있고 동일한 주파수 자원을 다수의 단말이 사용하면서 최대의 주파수 효율을 얻을 수 있는 비직교 다중접속(Non-Orthogonal Multiple Access: NOMA) 기술이 주목받고 있다^[2].

NOMA는 전력 영역(Power Domain)에서의 NOMA와 코드 영역(Code Domain)에서의 NOMA로 분류할 수 있다^[3]. 전력 영역에서의 NOMA는 사용자 간의 전송전력 차이를 이용하여 SIC (Successive Interference Cancellation) 수신기를 통해 사용자 신호를 구분하는 기술이다^[4]. 코드 영역에서의 NOMA는 코드분할 다중접속(Code Division Multiple Access: CDMA)과 같이 사용자별 코드를 할당하고 코드를 통해 사용자를 구분하는 기술이다. 대표적으로 LDS-CDMA (Low Density Signature-CDMA), LDS-OFDM (Low Density Signature-OFDM), SCMA (Sparse Code Multiple Access) 방식이 있다.

LDS-CDMA는 밀집(Dense)한 칩 시퀀스(Chip Sequence)를 사용하는 기존 CDMA와 달리 희소성(Sparsity)을 갖는 칩 시퀀스를 사용자 신호에 곱하여 다수의 반송파로 신호를 확산시켜 확산 이득을 얻고 희소성 특성을 이용하여 동일한 반송파를 사용하는 사용자의 수를 줄임으로써 검출 복잡도를 낮추는 방식이다^[5]. LDS-OFDM은 LDS-CDMA 신호가 OFDM 부반송파에 실리는 구조로 다중경로 페이딩에 강한 특징을 갖는다.

최근 제안된 SCMA는 새로운 방식의 LDS-OFDM 기술로서 기존의 기술에서 칩 시퀀스를 사용자 신호에 곱하는 것과 달리 사용자의 정보 비트를 희소성을 갖는 다차원 복소 코드워드에 맵핑하여 전송함으로써, 최대 1.53 dB의 다차원 신호 성장도 성형 이득(Multi-Dimensional Constellation Shaping Gain)을 얻을 수 있다^[6]. 또한 코드워드의 희소성을 이용하여 Maximum Likelihood (ML) 검출 기법의 성능에 근접하는 저복잡도 MPA (Message Passing Algorithm) 기반의 검출 기법을 수신기에 적용할 수 있다.

MPA 검출 기법은 그래프 기반 검출 기법으로서 Multi-User Multiple-Input Multiple-Output

(MU-MIMO) 시스템의 신뢰 전파(Belief Propagation: BP) 검출 기법과 유사하다^[7]. MIMO의 BP 검출 기법은 수신 안테나 노드와 사용자 노드 간의 신뢰 메시지(Belief Message) 전파를 통해 사용자의 신호를 검출하는 기법이며, SCMA의 MPA는 다수의 직교 주파수에 확산된 신호에서 직교자원 노드와 사용자 노드 간 신뢰 메시지를 교환하는 구조이다. 이러한 MIMO BP 검출 기법과 SCMA MPA 검출 기법의 조합을 통해 안테나와 직교자원 노드 및 사용자 노드 간의 메시지 교환을 통해 검출 성능을 극대화할 수 있지만, 안테나와 사용자 수가 증가함에 따라 검출 복잡도가 증가하는 문제가 있다. 복잡도 증가 문제 완화를 위해 [8], [9]는 단일 안테나 시스템에서 가우시안 근사(Gaussian Approximation: GA) 기반 MPA 구조를 제시하였다.

본 논문은 다중안테나 SCMA 시스템에서 기존 MPA 검출 기법과 가우시안 근사 기반의 MPA (GA-MPA) 기법을 비교 분석한다. 안테나 및 사용자 수 증가에 따른 MPA와 GA-MPA의 계산 복잡도를 비교하고, 모의실험을 통해 BER 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서는 SCMA 시스템 모델을 소개하고, SCMA의 인자 그래프(Factor Graph)와 다중안테나 SCMA의 인자 그래프를 살펴본다. III장에서는 인자그래프 기반의 MPA와 GA-MPA 검출 기법을 제시하고 계산 복잡도를 분석한다. IV장에서 수치해석 및 모의실험을 통해 MPA와 GA-MPA의 계산 복잡도 및 BER 성능을 비교한 후, V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 송신 안테나를 갖춘 J 명의 사용자와 N_r 개의 수신 안테나를 갖춘 기지국이 있는 상향링크 SCMA 시스템을 고려한다. 각 사용자의 신호는 기지국에서 동기화가 되어 있다고 가정한다. 각 사용자는 희소성을 가지는 SCMA 코드북을 할당받고, 각 사용자가 특정한 코드북을 저장한 상태에서 입력 비트는 코드북의 코드워드에 맵핑된 후 OFDM 부반송파(Subcarrier)를 통해 송신된다. 각 사용자의 코드북에는 M 개의 코드워드가 존재하고, $\log_2 M$ 개의 비트가 해당 코드워드에 맵핑된 후 K ($K < J$)개의 직교자원, 즉 K 개의 OFDM 부반송파에 확산(Spreading)되어 전송된다. 따라서 주파수 과부하 인자(Spectral Overloading Factor)는 $\lambda = J/K$ 로 나타낼 수 있다. 하나의 OFDM 부반송파를 공유하는 사용자의 수는 d_j

이며, 한 사용자의 신호는 d_v 개의 부반송파에 확산되어 전파된다.

본 논문에서는 [10]에서 제안한 SCMA 코드북을 적용하였다. $M=4, K=4, J=6, d_f=3, d_v=2$ 에 대한 SCMA 코드의 인자 그래프(Factor Graph)는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 일반적인 인자 그래프는 2분할 그래프(Bipartite Graphs) 형태로서 변수 노드(Variable Nodes)와 함수 노드(Function Nodes)로 나누어진다. 그림 1의 인자 그래프에서 변수 노드는 사용자가 보내는 SCMA 신호를 의미하고, 본 논문에서는 변수 노드가 아닌 사용자 노드로 칭한다. 함수 노드는 직교자원을 나타내며 본 논문에서는 자원 노드로 칭한다. 그림 1에서 첫째 자원 노드의 $f_1(x_2, x_3, x_5)$ 는 2, 3, 5번째의 사용자 신호가 f_1 직교자원을 공유함을 나타낸다. 인자 그래프는 아래와 같이 $K \times J$ 행렬로 표현할 수 있다.

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

식 (1)에서 $\mathbf{F}_{k,j}=1$ 는 k 번째 직교자원에 j 번째 사용자가 할당됨을 의미한다. 따라서 j 번째 사용자가 사용하는 직교자원의 인덱스 집합과 k 번째 직교자원을 사용하는 사용자의 인덱스 집합을 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbb{K}_j = \{k : \mathbf{F}_{k,j} = 1, k = 1, 2, \dots, K\} \quad (2)$$

$$\mathbb{J}_k = \{j : \mathbf{F}_{k,j} = 1, j = 1, 2, \dots, J\} \quad (3)$$

따라서 이상적으로 동기화가 이루어진 ℓ 번째 안테나의 k 번째 직교자원에 해당하는 SCMA 수신신호

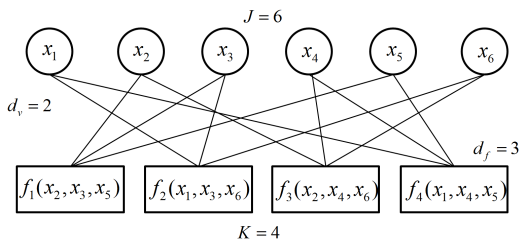


그림 1. SCMA 인자 그래프의 예($N_r=1, M=4, K=4, J=6, d_f=3, d_v=2$)
Fig. 1. An example of SCMA factor graphs ($N_r=1, M=4, K=4, J=6, d_f=3, d_v=2$)

$y_{\ell,k}$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{\ell,k} = \sum_{j \in \mathbb{J}_k} [\mathbf{H}]_k x_{j,k} + v_{\ell,k} \quad (4)$$

식 (4)에서 $\ell \in \{1, 2, \dots, N_r\}$ 은 ℓ 번째 수신 안테나, $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ 는 j 번째 사용자, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 는 k 번째 직교자원을 의미한다. $x_{j,k}$ 는 k 번째 직교자원에 할당된 j 번째 사용자의 송신신호를 의미한다. $[\mathbf{H}]_k$ 는 k 번째 직교 자원에서 $N_r \times d_f$ 크기의 MIMO 채널 행렬을 나타내며, 행렬의 각 요소는 평균이 0이고 단위 분산(Unit Variance)을 갖는 i.i.d. (Independent and Identically Distributed) 복소 가우시안 분포(Complex Gaussian Distribution)를 따른다. $v_{\ell,k}$ 는 ℓ 번째 안테나의 k 번째 직교자원에서의 AWGN (Additive White Gaussian Noise)을 나타내고 평균은 0, 분산은 σ^2 으로 가정한다.

식 (4)의 다중안테나 수신신호에 대한 인자 그래프는 그림 2(a)와 같이 나타낼 수 있다. 다중안테나의 경우 인자 그래프를 나타내는 행렬은 $N_r K \times J$ 크기의 $\mathbb{F} = [\mathbf{F}, \dots, \mathbf{F}, \dots, \mathbf{F}]^T$ 행렬로 표현할 수 있다. 따라서 수신안테나 수가 증가함에 따라 인자 그래프의 자원 노드도 이에 비례하여 $N_r K$ 로 증가하게 되고, 자원 노드와 사용자 노드 사이의 에지(Edge)의 수 또한 수신 안테나 수에 비례하여 $N_r K d_f$ 로 증가한다. 이러한 수

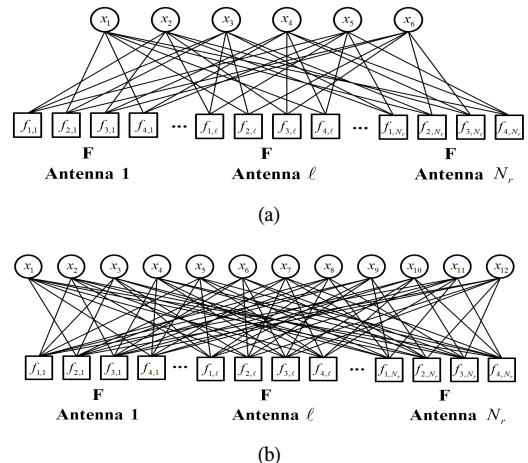


그림 2. 다중안테나 SCMA 시스템의 인자 그래프의 예: (a) $\lambda=1.5, M=4, K=4, J=6, d_f=3, d_v=2$ (b) $\lambda=3, M=4, K=4, J=12, d_f=6, d_v=2$
Fig. 2. Example of Multiple antennas SCMA Factor graphs: (a) $\lambda=1.5, M=4, K=4, J=6, d_f=3, d_v=2$ (b) $\lambda=3, M=4, K=4, J=12, d_f=6, d_v=2$

신안테나 수에 따른 검출 복잡도 증가 문제는 안테나 수가 매우 많은 대용량(Massive) MIMO 시스템에서 중요한 문제가 된다. 또한 그림 2(b)와 같이 d_f 가 증가하여 주파수 재사용률이 증가하면 검출 복잡도는 d_f 에 따라 지수적으로 증가하고 검출 성능은 열화되기 때문에 적절한 d_f 를 결정하는 것이 중요하다.

III. 다중안테나 MPA 신호 검출 기법

본 장에서는 상향링크 SCMA 신호 검출 기법에 대해서 알아본다. 먼저 3.1절에서 다중안테나 MPA 검출 기법에 대해서 설명하고 3.2절에서는 가우시안 근사 기반의 다중안테나 MPA 검출 기법(GA-MPA)을 제시한다. 3.3절에서는 다중안테나 MPA와 다중안테나 GA-MPA의 복잡도를 분석하였다.

3.1 다중안테나 MPA 검출 기법

식 (4)로부터 얻어지는 모든 안테나와 모든 직교 자원을 통해 수신되는 신호 $\mathbf{y} = [y_{1,1}, \dots, y_{\ell,k}, \dots, y_{N_r,K}]$ 로부터 모든 사용자의 송신신호 $\mathbf{x} = [x_{1,1}, \dots, x_{j,k}, \dots, x_{J,K}]$ 를 검출하기 위한 일반적인 MPA는 Maximum a Posteriori Probability (MAP) 검출 기법을 기반으로 하고, a Posteriori Probability는 아래와 같이 정의된다.

$$P(x_j | \mathbf{y}, \mathbf{H}) = \sum_{\mathbf{x} \setminus x_j} P(\mathbf{x} | \mathbf{y}, \mathbf{H}) \quad (5)$$

식 (5)에서 $\mathbf{H} \equiv \{[\mathbf{H}]_1, [\mathbf{H}]_2, \dots, [\mathbf{H}]_k\}$ 이고, $\mathbf{x} \setminus x_j$ 는 j 번째 사용자를 제외한 전체 송신 신호를 의미한다. 조건부 확률 $P(\mathbf{x} | \mathbf{y}, \mathbf{H})$ 은 베이즈 정리(Bayes' Theorem)에 의해 $P(\mathbf{y} | \mathbf{x}, \mathbf{H})P(\mathbf{x})$ 로 대체할 수 있으며, 따라서 식 (5)를 이용한 MAP 검출은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{x}_j = \underset{a \in C_j}{\operatorname{argmax}} \sum_{\mathbf{x} \setminus x_j} P(\mathbf{x}) \prod_{\ell, k \in \mathbb{K}_j} P(\mathbf{y}_{\ell, k} | \mathbf{x}_{k^c}, [\mathbf{H}]_k) \quad (6)$$

여기서 C_j 는 j 번째 사용자의 $2 \times K$ 차원 SCMA 코드북을 의미한다. 주어진 코드워드 조합의 조건부 확률은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\mathbf{y}_{\ell, k} | \mathbf{x}_{k^c}, [\mathbf{H}]_k) \approx \exp\left(-\frac{|\mathbf{y}_{\ell, k} - \sum_{j \in \mathbb{J}_k} [\mathbf{H}_{\ell, j}]_k x_{j, k}|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

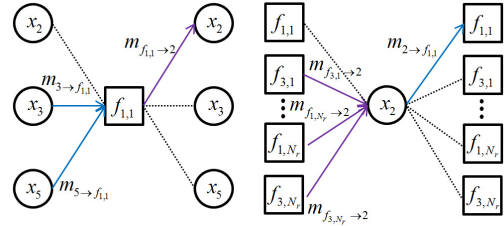


그림 3. MPA 검출기법의 메시지 전파 과정
Fig. 3. Message propagation process of MPA detection

인자그래프 기반의 MPA 알고리즘은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 예를 들어 첫 번째 안테나와 첫 번째 직교자원의 자원 노드($f_{1,1}$)에서 두 번째 사용자(x_2)에 전파되는 신뢰 메시지($m_{f_{1,1} \rightarrow x_2}$)는 인접 사용자 노드의 신뢰 메시지($m_{3 \rightarrow f_{1,1}}, m_{5 \rightarrow f_{1,1}}$)를 전파받아 전달된다. 마찬가지로 두 번째 사용자(x_2)에서 자원 노드($f_{1,1}$)에 전파되는 신뢰 메시지($m_{x_2 \rightarrow f_{1,1}}$)는 $f_{1,1}$ 을 제외한 x_2 에 연결된 모든 자원노드의 신뢰 메시지를 전파받아 $f_{1,1}$ 에 전달된다. 이러한 신뢰 메시지 전달 과정은 주어진 인자 그래프를 기반으로 모든 사용자 노드와 자원 노드에 걸쳐서 순환적으로 이루어지면서 일정한 값으로 수렴하게 된다.

전파되는 신뢰 메시지는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 자원 노드에서 사용자 노드로 전파되는 신뢰 메시지는 다음과 같다.

$$m_{\ell, k \rightarrow j} = \sum_{x_j = a} \mathbf{x} \setminus x_j P(\mathbf{y}_{\ell, k} | \mathbf{x}_k, [\mathbf{H}]_k) \prod_{j' \in \mathbb{J}_k \setminus j} m_{j' \rightarrow \ell, k} \quad (8)$$

또한 사용자 노드에서 자원 노드로 전파되는 신뢰 메시지는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$m_{j \rightarrow \ell, k} = \prod_{\ell, k' \in \mathbb{K}_j \setminus k} m_{\ell, k' \rightarrow j} \prod_{\substack{k' \in \mathbb{K}_j \\ \ell' \neq \ell}} m_{\ell', k' \rightarrow j} \quad (9)$$

T 번 순환을 통해 신뢰 전파가 충분히 이루어진 후 j 번째 사용자의 신호는 아래와 같이 검출 할 수 있다.

$$\hat{x}_j = \underset{a \in C_j}{\operatorname{argmax}} \prod_{\ell, k \in \mathbb{K}_j} m_{\ell, k \rightarrow j}^T \quad (10)$$

3.2 가우시안 근사 기반 MPA 검출 기법

3.1 절에서 살펴본 MPA의 기법은 단일 안테나 MAP 검출 기법을 확장한 것으로 복잡도는 $O(M^L)$ 이

다. 따라서 검출 복잡도가 d_f 값에 따라 지수적으로 증가하는 문제가 있다. 이러한 복잡도 증가 문제는 가우시안 근사를 통해 완화시킬 수 있다. 가우시안 근사는 식 (4)의 수신 신호에서 j 번째 사용자에게 대한 다른 사용자의 신호를 간섭으로 간주하고 이를 중심 극한 정리(Central Limit Theorem)에 따라 아래와 같이 가우시안 분포로 근사화한다.

$$\mathbf{y}_{\ell,k} = [\mathbf{H}_{\ell,j}]_k \mathbf{x}_{j,k} + [\mathbf{z}_{\ell,j}]_k, \quad (11)$$

$$[\mathbf{z}_{\ell,j}]_k \equiv \sum_{j' \in \mathbb{J}_k, j' \neq j} [\mathbf{H}_{\ell,j'}]_k \mathbf{x}_{j',k} + v_{\ell,k} \quad (12)$$

$[\mathbf{z}_{\ell,j}]_k$ 는 평균 $\mu_{[z_{\ell,j}]_k}$, 분산 $\sigma_{[z_{\ell,j}]_k}^2$ 인 복소 가우시안 분포로 $\mu_{[z_{\ell,j}]_k}$ 와 $\sigma_{[z_{\ell,j}]_k}^2$ 는 다음과 같다.

$$\mu_{[z_{\ell,j}]_k} = \sum_{j' \in \mathbb{J}_k, j' \neq j} [\mathbf{H}_{\ell,j'}]_k \mathbb{E}(\mathbf{x}_{j',k}), \quad (13)$$

$$\sigma_{[z_{\ell,j}]_k}^2 = \sum_{j' \in \mathbb{J}_k, j' \neq j} |[\mathbf{H}_{\ell,j'}]_k|^2 \mathbf{Var}(\mathbf{x}_{j',k}) + \sigma^2 \quad (14)$$

식 (13)-(14)에서, $\mathbb{E}(\mathbf{x}_{j',k})$ 와 $\mathbf{Var}(\mathbf{x}_{j',k})$ 은 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbb{E}(\mathbf{x}_{j',k}) = \sum_{m=1}^M C_j(k,m) P(\mathbf{x}_{j',k} = m), \quad (15)$$

$$\mathbf{Var}(\mathbf{x}_{j',k}) = \mathbb{E}(|\mathbf{x}_{j',k}|^2) - |\mathbb{E}(\mathbf{x}_{j',k})|^2 \quad (16)$$

이다. 여기서 $C_i(k,m)$ 은 i 번째 사용자의 k 번째 직교자원에서의 m 번째 코드워드를 의미한다. 식 (11)-(16)을 기초로 가우시안 근사 기반 MPA의 신뢰 메시지 전과 과정은 아래와 같다.

먼저 식 (8)과 같이 자원 노드에서 사용자 노드로의 신뢰 메시지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{\ell,k \rightarrow j} \approx \exp\left(-\frac{|\mathbf{y}_{\ell,k} - [\mathbf{H}_{\ell,j}]_k x_{j,k} - \mu_{[z_{\ell,j}]_k}|^2}{2\sigma_{[z_{\ell,j}]_k}^2}\right) \quad (17)$$

여기서 $\mu_{[z_{\ell,j}]_k}$ 와 $\sigma_{[z_{\ell,j}]_k}^2$ 은 식 (18)과 같이 인접 사용자 노드의 신뢰 메시지로부터 메시지 값이 갱신된다. 사용자 노드에서 자원 노드로의 신뢰 메시지는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{j \rightarrow \ell,k} = \prod_{\ell', k' \in \mathbb{K}_j, k} m_{\ell', k' \rightarrow j} \prod_{\substack{k' \in \mathbb{K}_j \\ \ell' \neq \ell}} m_{\ell', k' \rightarrow j} \quad (19)$$

T 번 순환(Iteration)을 통해 $\mu_{[z_{\ell,j}]_k}$ 와 $\sigma_{[z_{\ell,j}]_k}^2$ 가 $m_{j \rightarrow \ell,k}$ 로부터 충분히 갱신된 후 j 번째 사용자의 신호는 아래와 같이 검출할 수 있다.

$$\hat{x}_j = \underset{a \in \mathbb{C}_j}{\operatorname{argmax}} \prod_{\ell, k \in \mathbb{K}_j} m_{\ell, k \rightarrow j}^T \quad (20)$$

3.3 계산 복잡도 분석

MPA와 GA-MPA의 계산 복잡도를 분석하기 위해 부동 소수점 연산수(flops: floating point operation)를 이용하여 분석하였다. 일반적으로 부동 소수점 연산에서 복소수의 덧셈과 곱셈은 각각 2 flops와 6 flops가 소요된다. 또한 $\exp(x)$ 는 아래와 같이 테일러 급수(Taylor Series)를 통해 근사화가 가능하다.

$$e^x \approx \sum_{n=0}^p \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{6}x^3 \dots + \frac{1}{p!}x^p \quad (21)$$

여기서 p 는 테일러 다항식의 차수를 의미하며 5차 다항식일 경우 5번의 복소수 덧셈과 14번의 복소수 곱셈이 소요되며 이는 총 94 flops에 해당된다. MPA에서 식 (7)의 조건부 확률 계산에는 한번의 지수(Exponential) 계산과 d_f 번의 복소수 덧셈, d_f 번의 복소수 곱셈이 총 $N_r K M^{d_f}$ 번 필요하다. 따라서 조건부 확률 계산의 복잡도는 $N_r K M^{d_f}(94 + 24d_f)$ flops가 된다. 또한 식 (8)의 신뢰 메시지 $m_{\ell, k \rightarrow j}$ 계산에는

$$\mu_{[z_{\ell,j}]_k} = \sum_{j' \in \mathbb{J}_k, j' \neq j} [\mathbf{H}_{\ell,j'}]_k \sum_{i=1}^M C_j(k,i) m_{j' \rightarrow \ell,k}(x_{j'} = i) \quad (18a)$$

$$\sigma_{[z_{\ell,j}]_k}^2 = \sum_{j' \in \mathbb{J}_k, j' \neq j} |[\mathbf{H}_{\ell,j'}]_k|^2 \left\{ \sum_{i=1}^M |C_j(k,i)|^2 m_{j' \rightarrow \ell,k}(x_{j'} = i) - |\mu_{[z_{\ell,j}]_k}|^2 \right\} + \sigma^2 \quad (18b)$$

$14N_rKM^{d_f}$ flops가 소요된다. GA-MPA에서 식 (18a)는 $8Md_f + 4d_f - 10M - 2$ flops가 소요되며, (18b)는 $14Md_f + 20d_f - 14M - 20$ flops가 소요된다. 식 (17)의 신뢰 메시지 $m_{\ell,k \rightarrow j}$ 계산에는 $N_rK(22Md_f + 24d_f - 24M + 82)$ flops가 소요된다. 식 (9)와 식 (19)의 신뢰 메시지 $m_{j \rightarrow \ell,k}$ 계산에는 $6J(N_r - 1)d_vM$ flops가 소요되며, 식 (10)과 식(20)은 $6JN_r d_vM$ flops가 소요된다. 따라서 MPA와 GA-MPA의 총 계산 복잡도는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{MPA: } N_rKM^{d_f}(94 + 24d_f) + T\{14N_rKM^{d_f} + 6J(N_r - 1)d_vM\} + 6JN_r d_vM \quad (22)$$

$$\text{GA-MPA: } TN_rK(22Md_f + 24d_f - 24M + 82) + T\{6J(N_r - 1)d_vM\} + 6JN_r d_vM \quad (23)$$

일반적인 MU-MIMO 시스템에서 ML 검출 기법과 $O(M^J)$ 계산 복잡도를 갖지만, SCMA는 코드북의 희소성으로 인해 MPA 검출 기법을 적용하기 용이하면서 ML 검출 기법보다 낮은 $O(M^{d_f})$ 의 계산 복잡도를 갖게 된다. 또한 GA-MPA는 가우시안 근사화를 통해 계산 복잡도가 MPA보다 낮은 $O(M)$ 의 복잡도를 가진다.

IV. 수치해석 및 모의실험 결과

그림 4는 d_f 값의 증가에 따른 ML 검출 기법과 MPA, GA-MPA의 검출 복잡도의 수치해석 결과이다. 3.3절에서 고찰한 바와 같이 ML 검출 기법의 검출 복잡도는 사용자 수($J = d_f d_v$)에 따라 만큼 지수적으로 증가한다. 로그 눈금으로 결과를 나타내면 사용자 수에 따라 선형적으로 증가하는 그래프를 보여준다. MPA는 d_f 에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하게 되어 사용자 수에 따라 지수적으로 증가하는 ML과 비교하여 매우 낮은 복잡도를 갖는다. GA-MPA는 식 (23)에서 알 수 있듯이 d_f 값에 따라 계산 복잡도가 선형적으로 증가하게 된다. 이를 로그 눈금으로 나타내면 로그함수 형태로 증가하는 그래프를 확인할 수 있다. 따라서 GA-MPA는 ML과 MPA 검출 방식에 비해 매우 낮은 복잡도를 가짐을 확인할 수 있다.

그림 5는 안테나 수 증가에 따른 계산 복잡도를 로그 눈금으로 나타낸 것이다. 식 (22)과 식 (23)에서 알

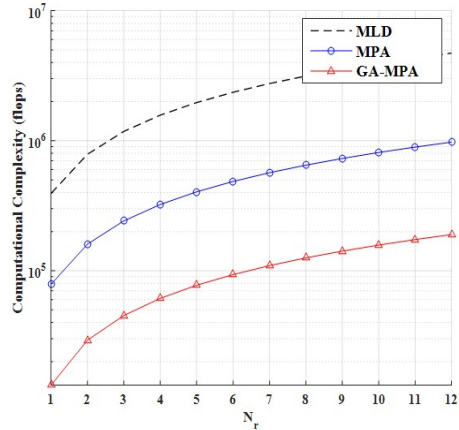


그림 4. d_f 증가에 따른 계산 복잡도 ($N_r = 1, M = 4, K = 4, d_v = 2, J = d_f d_v$)

Fig. 4. Computational complexity versus $d_f(N_r = 1, M = 4, K = 4, d_v = 2, J = d_f d_v)$

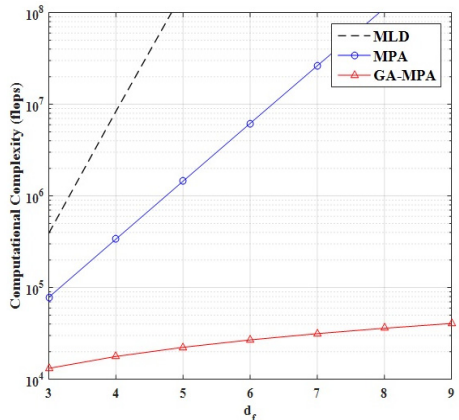


그림 5. 안테나 수 증가에 따른 계산 복잡도 ($M = 4, K = 4, d_f = 3, d_v = 2, J = 6$)

Fig. 5. Computational complexity versus the number of antennas ($M = 4, K = 4, d_f = 3, d_v = 2, J = 6$)

수 있듯이 MPA와 GA-MPA는 수신 안테나 수 증가에 따라 계산 복잡도가 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다.

그림 6-8은 그림 5에서 사용한 SCMA 파라미터를 적용한 모의실험 결과이다. 그림 6은 MPA와 GA-MPA의 순환 횟수에 따른 알고리즘의 수렴도를 SNR = 10dB에서 BER 그래프로 나타낸 것이다. MPA는 3-4번의 순환으로 BER이 수렴하는 것을 확인하였고, GA-MPA는 5-6번의 순환으로 BER이 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 AWGN 채널에서, 즉 $[H]_k = I_k$ 인 경우, ML, MPA, GA-MPA의 BER 성능을 비교한 그래프

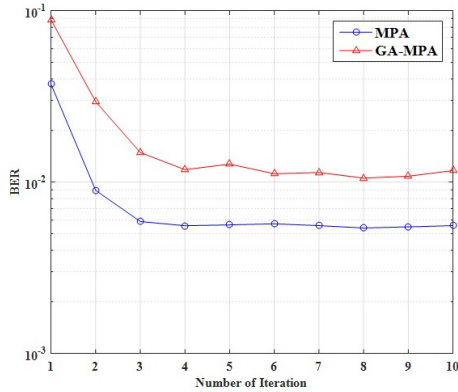


그림 6. 순환 횟수에 따른 수렴도
Fig. 6. Convergence behavior

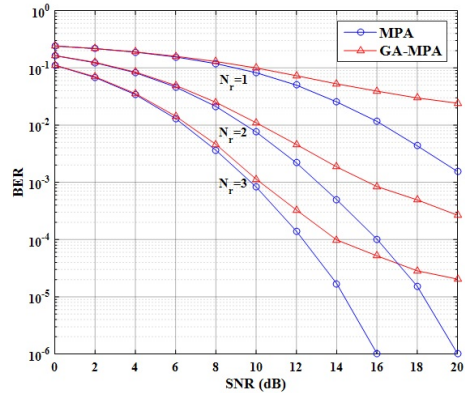


그림 8. 레일리 페이딩 채널에서 BER 성능
Fig. 8. BER performance in a Rayleigh fading channel

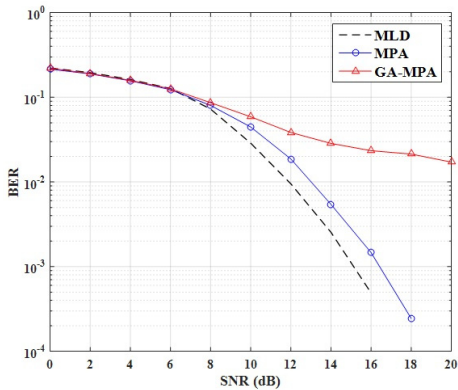


그림 7. AWGN 채널에서 SCMA의 BER 성능
Fig. 7. BER performance in an AWGN channel

이다. ML 방식은 사용자 신호의 모든 코드워드 경우의 수를 고려하기 때문에 가장 낮은 BER을 나타내는 대신 가장 복잡도가 높다. MPA는 ML과 비교하여 약 2dB 정도의 BER 성능 차이를 나타내며, GA-MPA는 식 (19)의 가우시안 근사에 따른 인접 노드의 신뢰 정보 손실에 의해 MPA의 간섭제거 성능이 열화됨을 확인할 수 있다. 특히 잡음에 비해 간섭의 영향이 지배적인 높은 SNR 영역에서 BER이 감소하지 않는 Error Floor 특성을 확인할 수 있다^[11].

그림 8은 레일리 페이딩 (Rayleigh Fading) 채널에서 MPA와 GA-MPA의 BER 성능을 비교한 것이다. 수신 안테나 수 증가에 따라 MPA 방식과 GA-MPA 방식 모두 다이버시티와 수신 전력 이득으로 인해 BER이 감소함을 확인할 수 있고, 그림 7과 마찬가지로 GA-MPA 방식은 가우시안 근사화로 인한 정보 손실로 성능 열화 현상이 발생하여 높은 SNR 영역에서 BER이 더 이상 낮아지지 않는 Error Floor 현상을 확

인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 다중안테나 SCMA 신호 검출을 위한 다중안테나 MPA와 가우시안 근사 기반의 다중안테나 MPA 검출 방식의 성능을 분석하였다. MPA 방식은 SCMA 코드워드의 회소성을 이용하여 ML 검출 기법에 근접하는 성능을 보이면서, ML 방식보다 낮은 복잡도를 갖는다. 가우시안 근사 기반의 MPA는 가장 낮은 복잡도를 나타내지만 가우시안 근사화에 따른 정보 손실로 인해 높은 SNR 영역에서 성능 열화가 발생함을 확인하였다. 추후 가우시안 근사에 따른 성능 열화 현상을 방지하고 사용자 수 및 안테나 수 증가에 따른 복잡도 증가 문제를 완화시키기 위한 MPA 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] F. Boccardi, "Five disruptive technology directions for 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, Feb. 2014.
- [2] S. R. Islam, J. M. Kim, and K. S. Kwak, "On non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 12, pp. 2549-2558, Dec. 2015.
- [3] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. L. I, and Z. Wang, "Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 74-81, Sept. 2015.

- [4] M. Irfan, J. W. Kim, and S. Y. Shin, "Spectral and energy efficient spatially modulated non-orthogonal multiple access (NOMA) for 5G," *J. KICS*, vol. 40, no. 8, pp. 1507-1514, Aug. 2015.
- [5] R. Hoshyar, F. P. Wathan, and R. Tafazolli, "Novel low-density signature for synchronous CDMA systems over AWGN channel," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56 no. 4, pp. 1616-1626, Apr. 2008.
- [6] H. Nikopour and H. Baligh, "Sparse code multiple access," in *Proc IEEE 24th Int. Symp. Personal, Indoor, and Mob. Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 332-336, Sept. 2013.
- [7] S. Park and S. Choi, "QR decomposition based sequential belief propagation detection scheme for MIMO systems," *J. KICS*, vol. 40, no. 9, pp. 1725-1727, Sept. 2015.
- [8] Y. Wang, L. Qiu, and X. Li, "An efficient low complexity Gaussian approximation-based scheme for SCMA detection," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC) Fall*, pp. 1-5, Sept. 2017.
- [9] Z. Tang, J. Wang, J. Wang, and J. Song, "A low-complexity detection algorithm for uplink NOMA system based on Gaussian approximation," in *Proc. IEEE Wireless Commun. & Net. Conf. (WCNC)*, pp. 1-6, Mar. 2017.
- [10] M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh, and H. Baligh, "SCMA codebook design," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC) Fall*, pp. 1-5, Sept. 2014.
- [11] T. Takahashi, S. Ibi, and S. Sampei, "On normalization of matched filter belief in GaBP for large MIMO detection," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC) Fall*, pp. 1-6, Sept. 2016.

강 길 모 (Gil-Mo Kang)



2013년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업
 2015년 2월 : 숭실대학교 전자공학과 석사
 2015년 3월~현재 : 숭실대학교 박사과정
 <관심분야> 통신시스템, 통신이론, 통신신호처리

김 현 민 (Hyeon Min Kim)



2012년 8월 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업
 2012년 9월~현재 : 숭실대학교 석·박사 통합과정
 <관심분야> 통신시스템, 통신이론, 통신신호처리

신 요 안 (Yoan Shin)



1987년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 12월 : 미국 University of Texas at Austin (공학박사)

1992년 12월~1994년 7월 : Austin 소재 MCC (Microelectronics & Computer Technology Corp.), Member of Technical Staff
 2009년 9월~2010년 8월 : University of British Columbia, Visiting Professor
 1994년 9월~현재 : 숭실대학교 전자정보공학부 교수
 <관심분야> 이동통신 시스템, Cognitive Radio, 무선측위 알고리즘

신 오 순 (Oh-Soon Shin)



1998년 2월 : 서울대학교 전기
공학부 졸업

2000년 2월 : 서울대학교 전기
공학부 석사

2004년 3월 : 서울대학교 전기·
컴퓨터공학부 박사

2004년 3월~2005년 9월 : 미국
Harvard University 박사후연구원

2006년 4월~2007년 8월 : 삼성전자 통신연구소 책임
연구원

2007년 9월~현재 : 숭실대학교 전자정보공학부 부교
수

<관심분야> 통신시스템, 통신이론, 통신신호처리