

논문 2017-54-7-2

제한된 연산량을 갖는 Dijkstra 탐색 기반의 스피어 디코딩

(Dijkstra's Search-Based Sphere Decoding with Complexity Constraint)

윤 혜 연*, 김 태 환**

(Hye-yeon Yoon and Tae-Hwan Kim[©])

요 약

본 논문은 MIMO 통신 시스템을 위한 Dijkstra 탐색 기반의 제한된 연산량을 갖는 스피어 디코딩 (sphere decoding; SD) 알고리즘을 제안하고 이에 대한 성능을 평가한다. Dijkstra 탐색 기반의 SD는 MIMO 심볼 검파 과정에서 저 복잡도로 준 최적의 에러율 성능을 달성하는 효율적인 tree 탐색 알고리즘이다. 하지만 Dijkstra 탐색 기반의 SD는 채널 환경에 따라 연산량이 가변적이고, 최악의 경우 전역 탐색의 경우에 해당하는 높은 연산량을 갖는 심각한 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 연산량을 제한시킨 새로운 Dijkstra 탐색 기반의 SD 알고리즘을 제시한다. 제안된 알고리즘은 연산량이 제한되었음에도 여전히 준 최적의 에러율 성능을 달성함을 모의 실험을 통해 검증하였다.

Abstract

This paper presents a Dijkstra's-search-based sphere decoding (SD) algorithm with limited complexity for the symbol detection in MIMO communication systems. The Dijkstra search-based SD is efficient to achieve a near-optimal error rate in the MIMO symbol detection, but has a critical problem in that its complexity is variable and can correspond to that of the exhaustive search in the worst case. The proposed algorithm limits the computations while achieving a near-optimal error rate. Simulation results show that the error rate is near optimal even with the limited complexity.

Keywords : sphere decoding, symbol detection, multiple-input multiple-output, tree search

I. 서 론

무선 통신 시스템에서 multiple-input multiple-output (MIMO) 기술은 추가적인 전송 전력 및 대역폭 사용 없이 공간 상의 다수의 전송 채널을 동시에 사용하여 에러율과 전송 속도를 향상 시킨다^[1]. 이를 통해 고성능의 데이터 통신을 가능케 한다. 하지만 MIMO 시스템

에서는 복잡한 심볼 검파 과정 때문에 수신 단의 높은 연산 복잡도를 가지게 된다. 따라서 고성능의 데이터 통신을 위해서는 효율적인 심볼 검파 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

MIMO 심볼 검파 과정에서 maximum-likelihood (ML) 해를 찾기 위해서는 송신 가능한 모든 심볼 벡터에 대해 비용 함수를 계산하여 가장 작은 비용 함수를

* 학생회원, ** 정회원, 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

© Corresponding Author (E-mail : taehwan.kim@kau.ac.kr)

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였으며 [2017-0-00528, 다중 모드 스마트 레이더용 지능형 반도체 개발 기초 연구실], 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 [NRF-2015R1D1A1A01059041].

Received : February 28, 2017 Revised : May 16, 2017 Accepted : June 9, 2017

갖는 심볼 벡터를 해로 선택하는 전역 탐색 과정을 수행해야 한다^[2-4]. 이러한 전역 탐색 과정은 최적의 성능을 달성하지만 높은 연산 복잡도를 갖는다. 한편, MIMO 심볼 검파 과정은 검파 tree의 탐색으로 모사할 수 있으며, 이를 기반으로 효율적인 트리 탐색 알고리즘을 도입하여 MIMO 심볼 검파 문제를 효과적으로 해결 할 수 있다^[5-14]. 본 논문에서는, 이러한 tree 탐색 기반의 검파 알고리즘을 스피어 디코딩 (sphere decoding; SD) 으로 통칭한다. ^[5]에서, 기존의 SD에 Schnorr-Euchner (SE) 열거를 도입하여 연산 복잡도를 낮춘 Depth-first-search (DFS) SD가 제안되었다. DFS-SD는 분기한정법(Branch and bound)에 기반한 깊이 우선 탐색을 통해 최적의 해를 찾는다^[5-7]. DFS-SD는 최적의 에러율 성능을 보장하지만 채널 환경에 따라서 검파에 소요되는 연산량이 유동적인 문제점이 있다. 2008년, L. G. Barbero는 고정된 검파 연산량을 가지는 K-best SD를 제안하였다^[8]. K-best SD는 넓이 우선 탐색에 M-알고리즘을 결합시킨 알고리즘이다^[8-11]. ^[12]에서, Dijkstra 알고리즘을 MIMO 심볼 검파에 도입한 Dijkstra 탐색 기반의 SD (Dijkstra-SD)가 제안되었다. Dijkstra-SD는 DFS-SD나 K-best 보다 낮은 연산 복잡도를 가지면서 준 최적의 에러율 성능을 보인다^[12-14].

하지만 Dijkstra-SD는 탐색에 필요한 연산량이 채널 환경에 따라 가변적이고, 최악의 경우 전역 탐색에 해당하는 높은 연산량을 갖을 수 있기 때문에 실제 시스템에 적용되기 어렵다. 또한, Dijkstra-SD는 알고리즘 진행 과정 중에 모든 레이어의 심볼을 포함하는 후보 해를 이미 찾았다고 보장할 수 없기 때문에, 연산량을 임의로 제한하여 조기 종료 (early termination) 시키기 어렵다. 이러한 문제는 DFS-SD와 상반되는데, DFS-SD에서는 알고리즘 진행 과정 중 모든 레이어의 심볼을 포함하는 후보 해를 이미 찾았다고 보장할 수 있기 때문이다^[15-17].

본 논문에서는 제한된 연산량을 갖는 새로운 Dijkstra-SD 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 기존의 Dijkstra-SD를 기반으로, 연산량의 상한을 설정하고, 이를 초과할 수 있는 상황을 감지하여 알고리즘을 효과적으로 종료하는 방법을 추가하여 검파에 소요되는 연산량을 제한한다. 이를 위해, 탐색 과정 중 연산량의 상한을 초과할 수 있는 상황에서 후보 해와 사용 가능한 잔여 연산량을 고려하여 연속 간섭 제거 기법 (successive interference cancellation; SIC)^[18] 을 도입하여 잔여 연산량 내에 검파를 종료한다. 제안하는 알고리즘은 블록

기반으로 검파에 필요한 총 연산량이 주어지는 경우 더 우수한 에러율 성능을 달성한다^[16]. 제안하는 알고리즘의 유효성이 다양한 환경에서의 모의 시험을 통해 검증되었다: 4×4 16QAM 시스템에서 10⁻⁵의 비트 에러율을 달성 할 때, 제안하는 알고리즘은 기존의 연산량이 제한되지 않은 Dijkstra 탐색 기반 SD와 비교했을 때 SNR 0.2dB 이하의 성능 차이를 보였다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 기존의 Dijkstra-SD에 기반한 MIMO 심볼 검파 알고리즘을 소개한다. III장에서는 연산량이 제한된 새로운 Dijkstra-SD 알고리즘을 제안한다. IV장에서 제안하는 알고리즘을 다양한 환경에서의 모의 실험하고 이를 바탕으로 유효성을 고찰한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 유도한다.

II. 기존의 Dijkstra-SD에 기반한 MIMO 심볼 검파

NT개의 송신 안테나와 NR개의 수신 안테나를 갖는 MIMO 통신 시스템은 다음과 같이 모델링 된다.

$$y = H \cdot x + n \quad (1)$$

y는 $N_R \times 1$ 크기의 수신 심볼 벡터, x는 $N_T \times 1$ 크기의 송신 심볼 벡터이다. H는 $N_R \times N_T$ 크기의 채널 행렬이며, H의 (i, j) 번째 요소는 i번째 송신 안테나로부터 j번째 수신 안테나까지의 복소 페이딩 감쇄이다. n은 $N_R \times 1$ 크기의 부가 잡음이며, n의 각 요소는 평균이 0, 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 확률 분포를 갖는다.

MIMO 심볼 검파는 주어진 y와 H에 대해서 x를 추정하는 것이다. MIMO 심볼 검파에서 ML 관점에서의 최적해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\arg \min_{x \in \Omega^{N_T}} \|y - H \cdot x\|^2 \quad (2)$$

$\|\cdot\|$ 는 L^2 -norm 연산을 나타내고 Ω 는 변조 방식에 따른 성상 내의 심볼 집합을 의미한다. H를 $Q \cdot R$ 분해함으로써, (2)는 다음과 같이 간소화 될 수 있다.

$$\arg \min_{x \in \Omega^{N_T}} \|\hat{y} - R \cdot x\|^2 \quad (3)$$

Q는 unitary 행렬, R은 upper-triangular 행렬이고 $\hat{y} = Q^T \cdot y$ 이다. R의 형태에 의해 (3)의 비용 함수를

다음과 같이 순차적으로 계산할 수 있다.

$$C_n = C_{n+1} + e_n \quad (4)$$

$$e_n = \left| \hat{y}_n - \left(\sum_{i=n+1}^{N_T} \chi_i r_{ni} \right) - \chi_n r_{nn} \right|^2 \quad (5)$$

본 식에서, \hat{y}_n 은 \hat{y} 의 n 번째 성분, r_{ij} 는 R 의 (i, j) 번째 성분, χ_i 는 χ 의 i 번째 성분이다. C_n 은 N_T 번째 레이어부터 n 번째 레이어까지 계산된 비용 함수이며, 비용 함수는 $C_{N_T} = 0$ 으로 초기화하여 C_1 까지 순차적으로 계산된다.

SD에서 비용 함수의 계산 과정은 검파 tree의 탐색 과정으로 모사할 수 있다. 검파 tree의 각 leaf노드까지의 path는 전체 심볼 벡터 공간 중 하나에 대응되며, 이 중 가장 짧은 path는 가장 작은 비용 함수 값을 갖는 심볼 벡터에 대응된다. 본 논문에서는 이러한 leaf 노드까지의 path를 full-length path라 칭한다. n 번째 레이어에 위치한 노드는 χ_n 을 나타내며, 해당 노드를 방문하는 것은 해당 노드에 대응되는 심볼에 의한 비용 함수의 증가분 e_n 을 (5)에 따라 계산하여 비용 함수 값을

갱신하는 것에 대응된다. SD에서는 full-length path 중 가장 짧은 것을 찾아냄으로써 심볼 검파를 수행하며, SD의 연산 복잡도는 검파 tree의 방문 횟수로 추산될 수 있다.

Dijkstra-SD는 검파 tree의 탐색을 Dijkstra가 제안한 best-first tree 탐색 방법에 의해 수행한다. 여러 문헌에서 Dijkstra-SD는 DFS-SD나 K-best SD보다 낮은 연산 복잡도를 보이면서 준 최적의 에러율 성능을 달성함이 입증되었다^[12-14]. 그림 1 (a)에 Dijkstra-SD의 처리 순서를 도시하였다. 현재 탐색 공간 안에서 가장 짧은 후보 path를 뽑아서, 뽑혀진 path가 full-length path가 아니라면 해당 path의 말단 노드의 자식 노드를 방문하여 트리를 확장시켜, 확장되어 만들어진 새로운 $|\Omega|$ 개의 path들을 탐색 공간에 추가한다. 여기서 $|\Omega|$ 는 Ω 의 크기를 의미한다. 뽑혀진 path가 full-length path라면 해당 path에 대응되는 심볼 벡터를 검파의 결과로 출력하며 알고리즘을 종료한다. s 는 검파 과정의 복잡도를 줄이고 하드웨어 구현을 용이하게 할 수 있도록 제한되는 탐색 공간의 크기이다. 탐색 공간의 크기 s 는 최적의 성능을 보장하도록 충분히 크게 설정된다^[14]. 확장되어 추가된 path들로 인하여 탐색 공간의 크기가 s 를 초과하는 경우, 후보 path들 중 길이가 긴 것들을 탐색 공간에서 제거하여 탐색 공간의 크기를 s 보다 커지지 않도록 유지한다.

Dijkstra-SD를 이용한 MIMO 심볼 검파를 그림 1 (b)에 예시하였다. 노드 안의 수는 검파 tree의 방문 횟수를, 에지 (edge)의 웨이트 (weight)는 비용 함수의 증가분, 즉 path 길이의 증가분을 의미한다. 회색 노드는 탐색 공간에 포함된 path의 말단 노드 들이고, 엑스 표시된 노드는 탐색 공간의 크기를 s 로 제한하기 위해 제거된 path의 말단 노드 들이다.

III. 제안하는 알고리즘

Dijkstra-SD는 저 복잡도로 준 최적의 성능을 달성하는 효율적인 심볼 검파 알고리즘이지만 실제 시스템에 적용하기 어려운 문제점이 있다. Dijkstra-SD는 full-length path를 찾을 때까지 알고리즘을 반복적으로 수행하는데, 채널 환경에 따라 소요되는 연산량이 가변적이고 최악의 경우에는 전역 탐색에 해당하는 높은 연산량이 소요된다. 또한 Dijkstra-SD는 알고리즘이 종료되기 전까지 어떠한 full-length path도 발견되지 않는 특성 때문에, 연산량을 제한하기 위해서 임의로 알고리즘

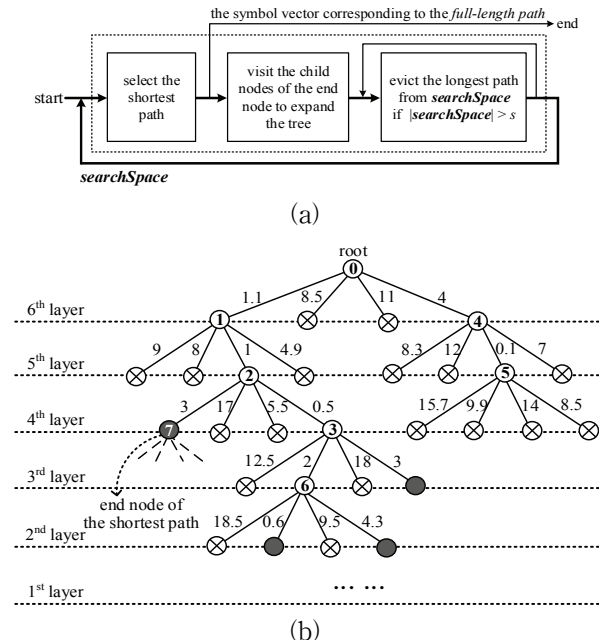


그림 1. (a) Dijkstra-SD 알고리즘의 처리 순서, (b) 6×6 QPSK MIMO 시스템에서 Dijkstra-SD를 통한 심볼 검파 예 (탐색 공간의 크기 s 는 4).

Fig. 1. (a) processing flow of Dijkstra-SD algorithm, (b) an example of the symbol detection by Dijkstra-SD for 6×6 QPSK MIMO system (the size of the search space, denoted by s , is constrained to 4).

```

1  searchSpace ← {the path having only the
   root}
2   $D_{cur} \leftarrow 0$ 
3  earlyStopPath ← the path having only the
   root
4   $L \leftarrow$  lowest layer of the symbols composing
   earlyStopPath
5  If  $(D_{max} - D_{cur}) - (L - 1) > 0$  then
   /*stopping criterion is not met*/
6  | candidatePath ← pick the shortest path
   from searchSpace
7  |  $D_{cur} \leftarrow D_{cur} + 1$ 
8  | If candidatePath is full-length then
9  | | algorithm ends with the symbol vector
   | | corresponding to candidatePath
10 | Else
11 | | childrenPaths ← expand
   | | candidatePath into the lower layer
   | | /*incurring tree-visiting*/
12 | | searchSpace ← searchSpace U
   | | childrenPaths
13 | | If the layer of the end node of
   | | candidatePath  $< L + 1$ 
14 | | | earlyStopPath ← the shortest path
   | | | among childrenPaths
15 | | End
16 | | While  $|\mathbf{searchSpace}| > s$  do
17 | | | evict the longest path from
   | | | searchSpace
18 | | End
19 | | go to line 3
20 | End
21 Else /*stopping criterion is met*/
22 | While earlyStopPath is not full-length
23 | | earlyStopPath ← expand earlyStopPath
   | | into the lower layer, and pick the
   | | shortest path among new expanded
   | | paths /*equivalent to SIC, incurring
   | | tree-visiting*/
24 | End
25 | algorithm ends with the symbol vector
   | corresponding to earlyStopPath
26 End

```

표 1. 제한된 연산량을 갖는 Dijkstra-SD 알고리즘 (연산량 상한= D_{max} , 탐색 공간의 크기= s)
Table1. Proposed Dijkstra-SD algorithm with complexity constraint (complexity constraint= D_{max} , size of the search space= s)

을 조기 종료하기 어렵다.

제안하는 알고리즘은 기존의 Dijkstra-SD 알고리즘에서 tree 탐색 도중 연산량의 상한을 초과할 수 있는 상황을 감지하여, 잔여 시간 동안 검파를 완료하여 알고리즘을 조기 종료한다. 제안하는 알고리즘의 연산량은 tree 방문 횟수로 추산되고, 최대 tree 방문 횟수를 설정하여 연산량을 제한한다. 알고리즘의 조기 종료는 확장된 path들 중에서 말단 노드가 가장 낮은 레이어에 위치한 것을 기반으로 진행된다. 해당 path의 나머지 부

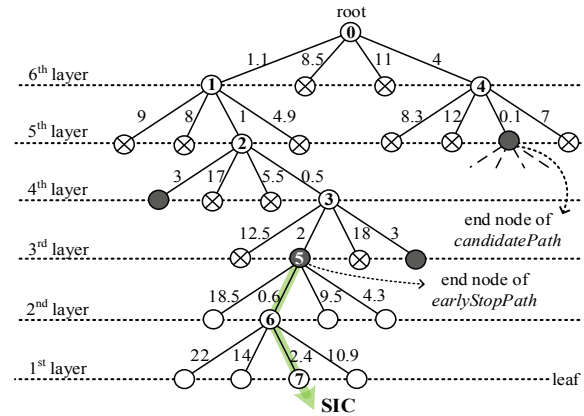


그림 2. 6×6 QPSK MIMO 시스템에서 제안하는 알고리즘을 통한 심볼 검파의 예 (탐색 공간의 크기 s 는 4).

Fig. 2. An example of the symbol detection by the proposed algorithm for 6×6 QPSK MIMO system (the size of the search space, denoted by s , is constrained to 4).

분을 구성하는 노드들을 SIC를 적용하여 순차적으로 구하여 full-length path로 완성하여 검파 결과로 취한다. 이렇게 조기 종료를 수행하기 위해서, 해당 path의 leaf쪽 말단 노드가 L 번째 레이어에 위치해 있다면, $L-1$ 번의 추가적인 tree 방문이 소요된다. 이를 통해, 알고리즘의 진행 과정 중에 확장된 path들 중에서 말단 노드가 가장 낮은 레이어에 위치한 것을 바탕으로 조기 종료 시간과 잔여 tree 방문 횟수를 비교하여 조기 종료 조건 (stopping criterion)을 설정한다.

표 1에 제안하는 알고리즘을 기술하였다. 연산량의 상한은 검파 tree의 최대 방문 횟수 D_{max} 로 주어진다. D_{cur} 는 검파 tree의 방문 횟수로 현재까지 소요된 연산량을 나타낸다. 13-15번 줄에서, 확장된 path들의 (childrenPaths) 말단 노드가 가장 낮은 레이어에 위치한 것 중 가장 짧은 path를 조기 종료를 위한 path (earlyStopPath) 에 저장한다. 5번 줄에서, 조기 종료를 위해 저장된 path의 말단 노드의 레이어 위치와 잔여 tree 방문 횟수를 고려하여 조기 종료 조건을 만족하면 조기 종료를 수행한다. 21-26번 줄에서, 조기 종료를 위해 저장된 path의 나머지 노드를 SIC에 기반하여 순차적으로 확장하여 full-length path를 완성하고, 이를 검파 결과로 출력하여 알고리즘을 종료한다. 그림 2는 제안하는 알고리즘을 통해 심볼을 검파 하는 예를 보인다. 검파 환경은 그림 1 (b)의 예와 동일하고, 검파 tree의 최대 방문 횟수 (D_{max}) 가 7로 주어진 것이다. 조기 종료 조건을 만족하는 5번째 방문부터는 path의 나머지

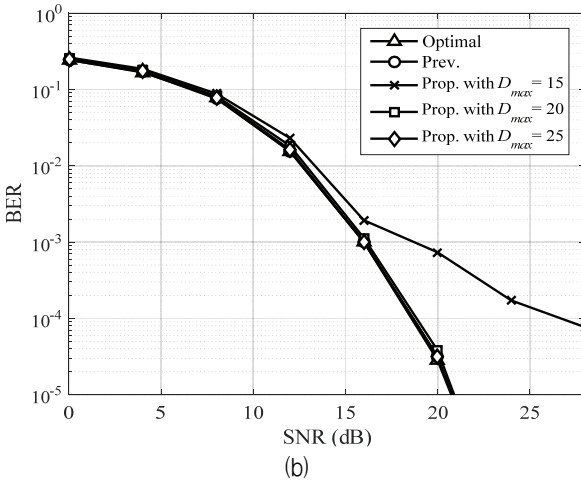
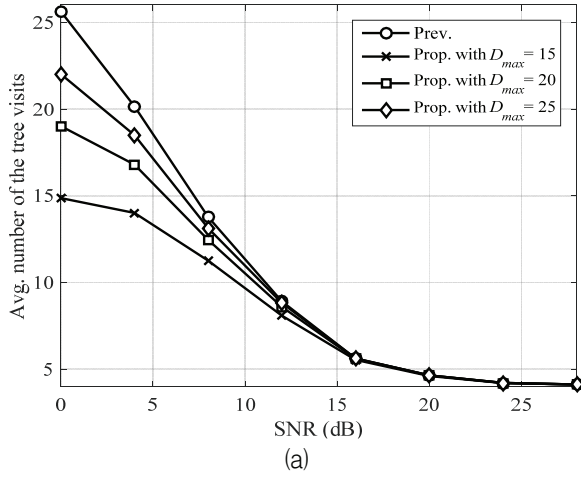


그림 3. 4×4 16QAM MIMO 시스템에서의 성능: (a) 검파 tree의 평균 방문 수, (b) 비트 에러율. (탐색 공간의 크기 s 는 32).

Fig. 3. Performance for 4×4 16QAM MIMO systems: (a) average number of the tree visits, and (b) bit-error-rate. (the size of the search space, denoted by s , is constrained to 32).

부분을 SIC 기반으로 순차적으로 확장하여 7번의 방문 내에 검파를 완료한다.

제안하는 알고리즘은 다수의 심볼 벡터로 구성된 전체 블록에 대해 검파에 소요되는 총 연산량이 주어진 경우 더 높은 에러율 성능을 달성할 수 있다^[16]. 이 경우, 전체 블록에서 심볼 검파에 소요되는 연산량의 상한을 초과하지 않는 범위 내에서 개별 심볼 벡터 검파에 소요되는 연산량의 상한을 유동적으로 할당한다. 이를 통해 개별 심볼 벡터에 대해서 고정적으로 연산량의 상한을 할당하는 경우와 비교하여 더 높은 에러율 성능을 달성할 수 있다. N 개의 심볼 벡터를 포함하는 블록에서 전체 심볼 검파에 소요되는 연산량의 상한이 ND_{\max} 로 주어질 때, n 번째 심볼 벡터를 위해 할당할 수 있는 연산량 상한 $D_{\max}(n)$ 은 다음과 같다.

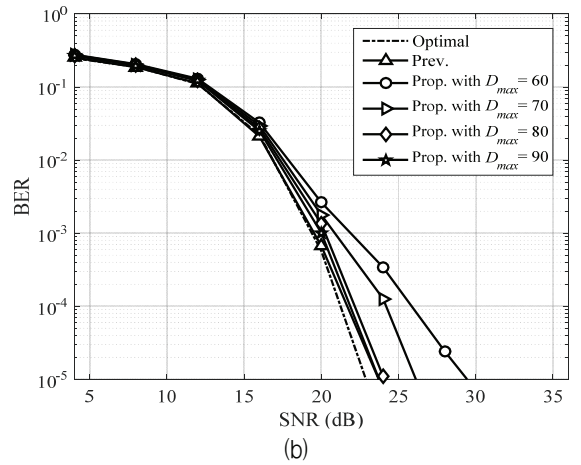
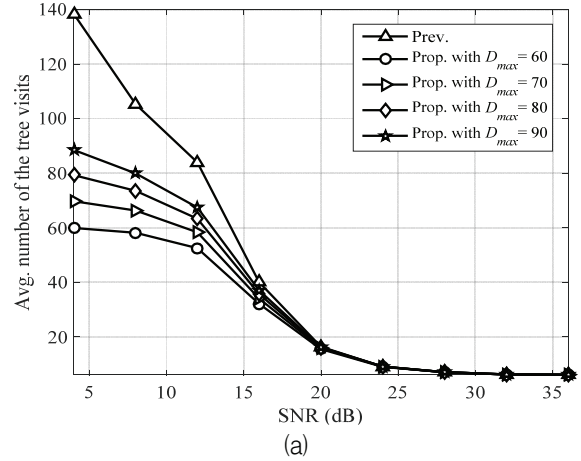


그림 4. 6×6 64QAM MIMO 시스템에서의 성능: (a) 검파 tree의 평균 방문 수, (b) 비트 에러율. (탐색 공간의 크기 s 는 64).

Fig. 4. Performance for 6×6 64QAM MIMO systems: (a) average number of the tree visits, and (b) bit-error-rate. (the size of the search space, denoted by s , is constrained to 64).

$$D_{\max}(n) = ND_{\max} - \sum_{i=1}^{n-1} D(i) - (N-n)N_T \quad (6)$$

본 식에서, $D(i)$ 는 i 번째 심볼 벡터의 검파에 소요된 연산량이다. $(N-n)N_T$ 는 남은 $(N-n)$ 개의 심볼 검파를 위한 알고리즘이 모두 root부터 조기 종료 되었다고 가정했을 때 소요되는 연산량으로, 남은 심볼 벡터를 모두 검파하기 위한 남겨두는 safety margin 이다.

IV. 실험 결과 및 고찰

제안된 알고리즘은 uncoded AWGN 채널 환경의 모의 실험을 통해 심볼 검파기 자체의 성능이 면밀히 평가 되었다. 모의 실험에서 신호대잡음비(signal-to-noise

ratio; SNR)는 E_s/N_o 으로 정의하고, E_s 는 수신 안테나의 심볼 에너지를 의미한다. 채널 행렬 \mathbf{H}_{iid} 의 각 요소는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수를 갖는다.

그림 3과 그림 4에 검파 tree의 평균 방문 횟수와 에러율 성능을 보인다. D_{max} 는 실제 통신 시스템에서 심볼 검파 과정에 주어질 수 있는 연산량의 상한에 의해서 할당되는 수치이다. 그림 3과 그림 4에서 보는 바와 같이 D_{max} 이 높은 값으로 설정될수록 에러율 성능이 좋지만 검파 tree의 평균 방문 횟수가 증가한다. 즉, 연산 복잡도와 에러율 성능은 서로 trade-off 관계를 갖는다. 그림 3 (b)와 그림 4 (b)는 제안된 알고리즘이 연산량이 제한됨에도 불구하고 준 최적의 에러율 성능을 달성한다는 것을 보인다. 4×4 16QAM 시스템에서 10^{-5} 의 비트 에러율을 달성 했을 때, 제한된 연산량을 갖는 Dijkstra-SD는 기존의 Dijkstra-SD와 SNR 0.2dB 이하의 성능 차이를 보였다.

추가적으로 실제적인 환경을 고려하기 위해, 상관 채널에서 제안된 알고리즘의 성능이 평가되었다. 채널 환경은 $\mathbf{H} = \sqrt{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{H}_{iid} \cdot \sqrt{\mathbf{B}}$ 에 의해 만들어 진다. A와 B는 각각 송신단과 수신단에서의 채널 공분산 행렬이며, $\mathbf{A}_{i,j} = \rho \mathbf{A}^{|k-j|}$, $\mathbf{B}_{i,j} = \rho \mathbf{B}^{|k-j|}$ 이다. 모의 실험에서 상관 채널은 $\rho_A = \rho_B = 0.3$ 에서 실현된다^[19]. 그림 5에 상관 채널 환경에서 검파 tree의 방문 횟수와 에러율 성능을 보인다. 상관 채널 환경에서 제안된 알고리즘은 연산량이 적절히 제한됨에도 불구하고 준 최적의 에러율 성능을 달성한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 MIMO 시스템을 위한 제한된 연산량을 갖는 Dijkstra 탐색 기반의 효율적인 SD를 제시하였다. 제안된 알고리즘은 Dijkstra-SD에 연산량 내에 알고리즘을 효율적으로 종료시키는 방법을 추가하여 검파에 소요되는 연산량을 제한한다. 이를 위해, 검파에 소요되는 연산량의 상한을 설정하고, 후보 해와 사용 가능한 잔여 연산량을 고려하여 제한된 연산량을 초과할 수 있는 상황에서 SIC를 기반으로 잔여 연산량 내에 알고리즘을 종료한다. 다양한 환경의 모의 실험을 통해, 제안된 알고리즘은 검파에 필요한 연산량이 제한됨에도 불구하고 준 최적의 성능을 달성한다는 것이 증명되었다: 4×4 16QAM 시스템에서 10^{-5} 의 비트 에러율을 달

성 했을 때, 제안된 알고리즘은 기존의 연산량이 제한되지 않은 기존의 알고리즘과 SNR 0.2dB 이하의 성능 차이를 보였다.

REFERENCES

- [1] B. M. Hochwald and S. Ten Brink, "Achieving near-capacity on a multiple-antenna channel," IEEE Trans. Commun., vol. 51, no. 3, pp. 389-399, Mar. 2003.
- [2] E. G. Larsson, "MIMO detection methods: How they work [lecture notes]," IEEE Signal Process. Mag., vol. 26, no. 3, pp. 91-95, May 2009.
- [3] S. Yang and L. Hanzo, "Fifty years of MIMO detection: The road to large-scale MIMOs," IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 4, pp. 1941-1988, Sep. 2015.
- [4] M. C. Shin, Y. S. Song, D. S. Kwon, J. T. Seo, C. Y. Lee, "Performance analysis of maximum likelihood detection for the spatial multiplexing system with multiple antennas," Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, vol 42, no 12, pp 103-110, Dec. 2005.
- [5] C. P. Schnorr and M. Euchner, "Lattice basis reduction: improved practical algorithms and solving subset sum problems," Mathematical Programming, vol. 66, pp. 181-199, 1994.
- [6] X. Chen, G. He, and J. Ma, "VLSI implementation of a high-throughput iterative fixed-complexity sphere decoder," IEEE Trans. Circuits Syst. II, vol. 60, no. 5, pp. 272-276, May 2013.
- [7] D. Seethaler and H. Bolcskei, "Infinity-norm sphere-decoding," in Proc. Int. Symp. Inf. Theory, Jul. 2008, pp. 2002-2006.
- [8] L. G. Barbero and J. S. Thompson, "Fixing the complexity of the sphere decoder for MIMO detection," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, pp. 2131-2142, June 2008.
- [9] M. Wenk, M. Zellweger, A. Burg, N. Felber, and W. Fichtner, "K-best MIMO detection VLSI architectures achieving up to 424 Mbps," in Proc. Int. Symp. Circuits Syst., May 2006, pp. 1151-1154.
- [10] T.-H. Kim and I.-C. Park, "Small-area and low-energy K-best MIMO detector using relaxed tree expansion and early forwarding," IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 57, no. 10, pp. 2753-2761, Oct. 2010.
- [11] J. W. Kim, J. W. Kang, C. Y. Lee, "An Adaptive K-best detection algorithm for MIMO systems," Journal of The Institute of Electronics

- and Information Engineers, vol 43, no 10, pp 1-7, Oct. 2006.
- [12] T. Fukatani, R. Matsumoto, and T. Uyematsu, "Two methods for decreasing the computational complexity of the MIMO ML decoder," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E87-A, no. 10, pp. 2571-2576, Oct.2004.
- [13] M. Myllyla, M. Juntti, and J. R. Cavallaro, "A list sphere detector based on Dijkstra's algorithm for MIMO-OFDM systems," in Proc. Personal, Indoor Mobile Radio Commun., Sep. 2007, pp. 1-5.
- [14] T.-H. Kim and I.-C. Park, "High-throughput and area-efficient MIMO symbol detection based on modified Dijkstra's search," IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 57, no. 7, pp. 1756-1766, July 2010.
- [15] A. Burg, M. Wenk, and W. Fichtner, "VLSI implementation of pipelined sphere decoding with early termination," presented at the EUSIPCO, Florence, Italy, Sep. 2006.
- [16] A. Burg, M. Borgmann, M. Wenk, C. Studer, and H. BOLSKEI, "Advanced receiver algorithms for MIMO wireless communications," in Proc. Conf. Design, Automation and Test in Europe. European Design and Automation Association, 2006, pp. 593-598.
- [17] T.-H. Kim and J.-H. Kim "Partitioned scheduling for sphere decoding with runtime constraints for practical MIMO communication systems," in Proc. Personal, Indoor Mobile Radio Commun., Aug. 2015, pp. 721-725.
- [18] G. D. Golden, G. J. Foschini, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communications architecture," IEE Electron. Lett., vol. 35, pp. 14-16, Jan. 1999.
- [19] T. Handte, A. Muller, and J. Speidel, "BER analysis and optimization of generalized spatial modulation in correlated fading channels," in Proc. Veh. Tech. Conf. IEEE, Sep. 2009, pp. 1-5.

 저 자 소 개



윤 혜 연(학생회원)
 2016년 한국항공대학교 정보통신공
 학과 학사 졸업
 2017년 현재 한국항공대학교 항공
 전자정보공학과 석사과정
 재학중.

<주관심분야: 회로 및 시스템, VLSI 설계, ASIC
 설계>



김 태 환(정회원)-교신저자
 2005년 연세대학교 전기전자 공학
 과 학사 졸업.
 2007년 한국과학기술원 전기 및 전
 자공학과 석사 졸업.
 2010년 한국과학기술원 전기 및 전
 자공학과 박사 졸업.

2011년~현재 한국항공대학교 항공전자정보공학과
 교수.

<주관심분야: 회로 및 시스템, VLSI 설계, ASIC
 설계>