

2-레벨 탐색을 이용한 스피어 디코딩 알고리즘

정회원 현 트롱안*, 준회원 조 종 민*, 종신회원 김 진 상*, 정회원 조 원 경*

Sphere Decoding Algorithm Using Two-Level Search

Tronganh Huynh* *Regular Member*, Jongmin Cho* *Associate Member*,
Jinsang Kim* *Lifelong Member*, Won-Kyung Cho* *Regular Member*

요 약

스피어 디코딩은 MIMO 심볼검출 기법 중 가장 유망한 기법 중 하나로 알려져 있다. 본 논문에서는 새로운 2 레벨 탐색 스피어 디코딩 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 심볼검출 시에 성능향상에 영향을 줄 수 있는 유용한 후보군이 이전 단계에서 버려지는 것을 피하기 위해서, 2 레벨 트리탐색을 동시에 수행한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘이 BER 측면에서 기존의 알고리즘보다 성능이 우수함을 확인하였다.

Key Words : Sphere decoding, MIMO, VLSI, Space-Time Codes, Space-Division Multiplexing

ABSTRACT

Sphere decoding is considered as one of the most promising methods for multiple-input multiple-output (MIMO) detection. This paper proposes a novel 2-level-search sphere decoding algorithm. In the proposed algorithm, symbol detection is concurrently performed on two levels of the tree search, which helps avoid discarding good candidates at early stages. Simulation results demonstrate the good performance of the proposed algorithm in terms of bit-error-rate (BER).

1. 서 론

오늘날 무선랜과 이동통신 분야의 전송용량에 대한 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. MIMO 기술은 위와 같이 계속 증가되는 전송용량 수요를 실현할 수 있는 돌파구로 간주되고 있다^{[1]-[6]}. 또한 VLSI(Very Large Scale Integration) 기술의 발전은 MIMO 기술을 구현가능하게 해주고 있다^{[7]-[13]}. 일반적으로 MIMO 기법은 시공간부호화(Space-Time Coding)와 공간분할다중화(Space-Division Multiplexing)로 나눌 수 있다. 시공간부호화는 서로 다른 안테나에서 전송되는 데이터를 인코딩함으로써 무선 통신 시스템의 신뢰성을 높일 수 있는 기술이다. 시공간부호화의 목표는 무선 페이딩 채널환경 하에서 다이버시티 이

득을 최대화하는데 있다^[2]. 반면에 공간분할다중화는 각 안테나에서 서로 독립적인 데이터를 동시에 전송함으로써 데이터 전송률을 높이는데 그 목적이 있다^[4]. 그러나 공간분할다중화의 가장 큰 문제점은 송신 안테나의 수와 변조방식이 높아질수록 수신기에서 디코딩 복잡도가 크게 증가하는데 있다. 그러므로 공간분할 다중화 시스템에서는 공간적으로 다중화 되어 있는 데이터를 효과적으로 분리하는 알고리즘과 구현 방법이 필요하다.

많은 심볼 검출 알고리즘이 공간분할 다중화를 위하여 제안되었다. ML(Maximum Likelihood) 검출은 성능측면에서 가장 우수한 기법이나, 안테나 수와 변조방식의 크기가 증가하면 그 복잡도가 지수적으로 증가하기 때문에 구현이 매우 어렵다. 이

※ 본 연구는 한국학술진흥재단(KRF-2006-521-D00337), ITRC(IITA-2008-C1090-0801-002)의 지원으로 수행되었습니다.

* 경희대학교 전자전파공학과 (jskim27@khu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-02-069, 접수일자 : 2008년 2월 9일, 최종논문접수일자 : 2008년 10월 17일

러한 ML 검출의 복잡도를 감소시키기 위하여 스피어 디코딩이 개발 되었다. 일반적으로 스피어 디코딩 기법은 depth-first 탐색과 breadth-first 탐색 방법으로 분류할 수 있다.

Schnorr-Euchner에 의해 제안된 Depth-first 탐색 알고리즘^[7]은 ML 검출의 복잡도를 낮출 수 있다. 이 방법들은 전후방으로 트리탐색을 함으로써 ML 검출의 복잡도를 낮출 수 있으나^{[8]-[13]}, 디지털 회로에서 throughput을 높일 수 있는 파이프라인 특성을 이용하여 구현할 수 없다. 또한, 연산량이 가변적이기 때문에 최악의 경우 ML 검출의 복잡도를 갖는 탐색을 해야 한다^[12].

반면에 breadth-first 탐색 알고리즘^{[14]-[18]}은 전방 방향으로만 최적의 후보군을 찾는다. K-best 스피어 디코딩 알고리즘^[15]은 각 트리탐색 레벨에서 K개의 최적의 후보군만을 저장한다. breadth-first 탐색 알고리즘에서는 depth-first 탐색 알고리즘과는 다르게 파이프라인과 일정한 throughput이 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 breadth-first 탐색 알고리즘은 MIMO 심볼검출 시 K 파라미터 값이 작을 경우, BER 측면에서 성능 열화가 발생하고 throughput을 일정하게 유지 시킬 수 있다 할지라도 디코딩 latency가 매우 큰 단점이 있다.

본 논문에서는 새로운 스피어 디코딩 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 최적의 후보군을 찾는 과정에서 성능 향상에 도움을 줄 수 있는 잠재적인 후보군이 삭제될 가능성을 배제하기 위해서 트리탐색시 2개 레벨에서 동시에 심볼검출을 수행한다. 탐색의 각 레벨에서는 K개의 심볼 쌍이 유지된다. 기존의 알고리즘과 비교했을 때 제안된 알고리즘의 탐색 레벨의 수는 절반으로 감소되었고, 잠재적인 후보군을 찾기 위한 심볼탐색 공간이 확장되었기 때문에 성능을 향상 시킬 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서의 MIMO 시스템은 M개의 송신 안테나와 N개의 수신 안테나로 이루어지고, 기저대역 N차원 수신 심볼 벡터는 식 (1)로 나타난다.

$$\hat{y} = \hat{H}\hat{s} + \hat{n} \quad (1)$$

여기서 $\hat{s} = [\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_M]^T$ 는 M차원 송신 신호 벡터이고 각 신호성분들은 BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM과 같은 복소 성좌도내에서 독립적으로 나

타나는 심볼이다. \hat{H} 는 $N \times M$ 채널 행렬이고, 행렬내의 \hat{h}_{ij} 는 j번째 송신안테나와 i번째 수신안테나 사이의 전달함수이다. 모든 \hat{h}_{ij} 는 각 차원마다 평균값이 0이고 분산이 0.5인 i.i.d 복소 랜덤 가우시안 변수이고 수신기에서는 이 채널 정보를 모두 알고 있다고 가정한다. $\hat{n} = [\hat{n}_1, \hat{n}_2, \dots, \hat{n}_N]^T$ 는 평균 0, 분산 σ^2 인 i.i.d 복소 가우시안 잡음이다. 식 (1)의 복소수 형태의 식은 아래의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{y}) \\ \mathcal{I}(\hat{y}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{H}) - \mathcal{I}(\hat{H}) \\ \mathcal{I}(\hat{H}) \mathcal{R}(\hat{H}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{s}) \\ \mathcal{I}(\hat{s}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{n}) \\ \mathcal{I}(\hat{n}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\mathcal{R}(\cdot)$ 과 $\mathcal{I}(\cdot)$ 는 (\cdot) 의 실수부와 허수부이다. n 을 $2N$, m 을 $2M$ 라 하고 식 (2)의 $n \times m$ 채널 행렬 \hat{H} 는 식 (3)과 같이 QR분할방식으로 삼각행렬로 표현할 수 있다.

$$\hat{H} = QR \quad (3)$$

여기서 R 는 $m \times m$ 상삼각행렬이고 Q 는 직교하는 열을 갖는 $n \times m$ 행렬이다. 식 (2)에 QH 를 곱하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$y = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \dots & R_{1,2M} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \dots & R_{2,2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{2M,1} & R_{2M,2} & \dots & R_{2M,2M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{s}) \\ \mathcal{I}(\hat{s}) \end{bmatrix} + Q^H \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{n}) \\ \mathcal{I}(\hat{n}) \end{bmatrix} = R\hat{s} + \hat{n}' \quad (4)$$

여기서 $y = Q^H \hat{y}$ 이고 $\hat{n}' = Q^H \hat{n}$ 이다. MIMO 검출의 목적은 성좌도 상에서 가장 가까운 심볼위치, \hat{s} 를 찾는 것이고 이는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{s} = \underset{s \in \Omega}{\operatorname{argmin}} \|y - Rs\|^2 \quad (5)$$

여기서 각 s 의 값은 실수 성좌도내의 점 Ω 즉 $s \in \Omega^M$ 에서 정의된다.

III. 제안된 2 레벨 탐색 스피어 디코딩 알고리즘

본 논문에서는 효율적인 하드웨어 측면뿐만 아니라 BER 성능을 유지하는 새로운 breadth-first 탐색 스피어 디코딩 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 성능 향상을 위해서 트리탐색시 두 레벨에 걸쳐 동시에 후보를 탐색하는 방법을 이용하였다. 그림 1(a)은 일반적인 스피어 디코딩방법에 대한 것으

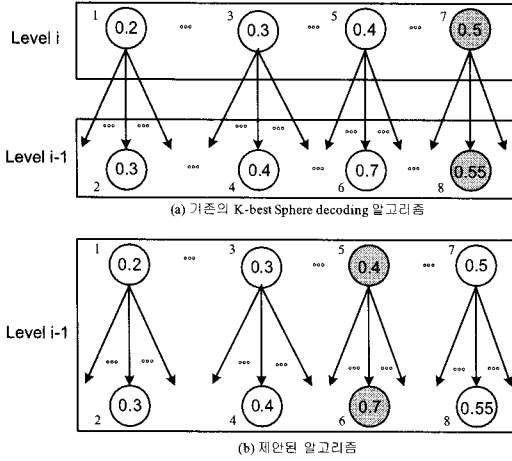


그림 1. 기존 및 제안된 알고리즘의 탐색과정 비교

로써 트리탐색의 레벨 i 의 노드 1, 3, 5가 선택된 후보군임을 나타내고, 이들은 각각 누적 PED (partial Euclidean distance) 값 0.2, 0.3, 0.4를 가지고 있다. 여기서 노드 7은 높은 PED 값으로 인해서 버려진 것을 볼 수 있다. 선택된 후보군 노드들을 레벨 $i-1$ 로 확장하여 새로운 PED 값을 연산하고 다시 후보군 노드를 갱신하면 노드 2, 4, 6이 선택되는 것을 볼 수 있다. 노드 8은 노드 6보다 더 낮은 PED 값을 가지고 있지만 이미 레벨 i 에서 노드 7값이 버려졌기 때문에 두 레벨의 탐색과정 동안 최적의 후보군은 노드쌍 (1, 2), (3, 4), (5, 6)이 된다. 반면에 그림 1(b)와 같이 제안된 알고리즘은 최적의 심볼쌍을 찾기 위하여 2 레벨에서 동시에 탐색을 수행한다. 노드쌍 (7, 8)의 최종 누적 PED 값은 0.55이고 노드 (5, 6)의 최종 누적 PED는 0.7이기 때문에 현재 레벨에서의 최종적으로 선택된 후보군은 (7, 8), (1, 2), (3, 4)가 된다. 2 레벨 탐색을 이용한 제안된 알고리즘은 탐색 영역이 확장되어 성능개선에 영향을 줄 수 있는 잠재적인 후보군이 버려지는 것을 막을 수 있기 때문에 MIMO 검출기의 성능을 향상시킬 수 있다.

제안된 알고리즘은 다음과 같이 요약할 수 있다.

단계 1) (초기화) 초기 PED $L_{M+1} = 0$, 입력 y, R .

단계 2) (각 레벨 i 에서 PED 연산)

$i = M, M-1, M-2, \dots, 1$.

레벨 i 에서 PED $L_i(s^{(j-1)})$ 는 식 (6)과 같다.

$$L_i(s^{(j-1)}) = L_{i+1}(s^{(j+1)}) + \left| y_i - \sum_{k=j}^{2M} R_{i,k} s_k \right|^2 + \left| y_{i-1} - \sum_{k=j-1}^{2M} R_{i-1,k} s_k \right|^2 \quad (6)$$

여기서 $j = 2i$ 이다. 식 (6)에서 $s^{(j+1)} = [s_{j+1} \ s_{j+2} \ \dots \ s_{2M}]$ 는 트리탐색의 이전 레벨에서 찾아진 심볼의 부분 벡터이다. 식 (6)은 식 (7)과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$L_i(s^{(j-1)}) = L_{i+1}(s^{(j+1)}) + \left| y_{j-1} - R_{j,j} s_j - \sum_{k=j+1}^{2M} R_{j,k} s_k \right|^2 + \left| y_j - R_{j-1,j-1} s_{j-1} - R_{j-1,j} s_j - \sum_{k=j+1}^{2M} R_{j-1,k} s_k \right|^2 = L_{i+1}(s^{(j+1)}) + \left| y_{j-1} - R_{j,j} s_j - a_j(s^{(j+1)}) \right|^2 + \left| y_j - R_{j-1,j-1} s_{j-1} - R_{j-1,j} s_j - b_j(s^{(j+1)}) \right|^2 \quad (7)$$

식 (7)에서의 $a_j(s^{(j+1)}) = \sum_{k=j+1}^{2M} R_{j,k} s_k$ 항과 $b_j(s^{(j+1)}) = \sum_{k=j+1}^{2M} R_{j-1,k} s_k$ 항은 이전 레벨에서 검출된 $s^{(j+1)}$ 에 의해서만 영향을 받는다. Ω 가 K 개이고 레벨 $i-1$ 에서 $Ki-1$ 개의 후보군 $s^{(j+1)}$ 을 갖는다면, 이 단계에서 전체 PED 값의 갯수는 $G = (Ki-1) \times Q$ 가 된다.

단계 3) (정렬) $L_i(s^{(j-1)})$ 을 오름차순으로 정렬하고 K_i 의 최소값을 선택한다. PED 값에 의해 정해진 K_i 개의 심볼쌍 (s_j, s_{j-1})를 저장하고 단계 2로 돌아간다. 레벨 1이 트리탐색의 마지막 레벨이기 때문에 $K_i=1$ 이 된다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 2는 4×4 MIMO 시스템에서 16-QAM 변조를 사용했을 때 기존 스피어 디코딩 알고리즘과 제안된 알고리즘의 BER 성능을 보여준다. 후보군의 탐색영역을 확장한 제안된 알고리즘이 BER 측면에서 더 좋은 성능을 보이는 것을 볼 수 있다.

본 논문에서는 K_i 값이 제안된 알고리즘의 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서 다양한 K_i 값으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 제안된 MIMO 검출기에 3가지 서로 다른 K_i 값을 초기화 ($K_1 = 1, K_2 = 4, K_3 = 4, K_4 = 4$), ($K_1 = 1, K_2 = 5, K_3 = 5, K_4 = 5$), ($K_1 = 1, K_2 = 6, K_3 = 6, K_4 = 6$) 함으로써 나타나는 BER의 변화에 대해서 보여준다. 그림 3과 같이 K_i 를 ($K_1 = 1, K_2 = 6, K_3 = 6, K_4 = 6$)로 설정할 때가 가장 좋은 성능을 가지는 것을 볼 수 있고, 작은 K_i 값은 성능의 열화를 가져오는 것을 알 수 있다. 제안된 MIMO 검출

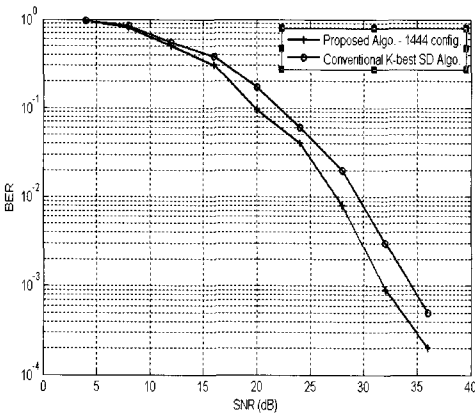


그림 2. 기존 알고리즘과 제안된 알고리즘의 BER 비교

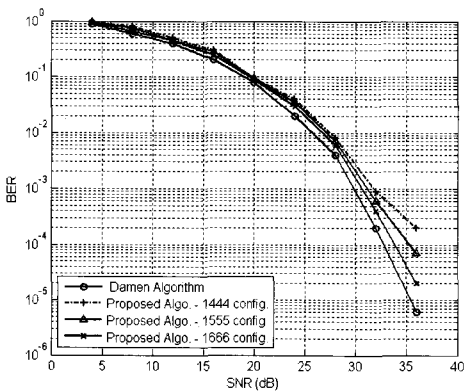


그림 3. 다양한 K, 초기값을 이용한 BER 성능비교

기가 충분히 큰 K값을 갖는다면 BER 곡선이 Damen등에 의해 제안된 depth-first 알고리즘^[13]에 근접하는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 MIMO 검출 시스템을 위한 2 레벨 탐색 스피어 디코딩 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 트리탐색과정의 2 레벨에서 동시에 심볼검출을 함으로써 탐색공간이 확장되기 때문에 성능향상에 영향을 주는 중간단계의 후보군이 버려지는 것을 방지할 수 있다. 시뮬레이션결과 제안된 알고리즘이 기존의 알고리즘보다 성능이 우수함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] G. J. Foschini, "Layered space-time architec-

ture for wireless communication in fading environments when using multiple antennas," *BellLabs, Tech. J.*, Vol.2, pp.41-59, 1996.

[2] G. J. Foschini Jr. and M. J. Gans, "On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun.*, Mar. 1998.

[3] S. A. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communication," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.16, pp.1451 - 1458, Oct. 1998.

[4] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An architecture for realizing very high data-rates over the rich scattering widess echannel," *IEEE ISSSE-98*, Sep., 1998.

[5] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.45, pp.1456 - 1467, July 1999.

[6] T. L. Marzetta and B. M. Hochwald, "Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.45, pp.139 - 157, Jan. 1999.

[7] C. P. Schnorr and M. Euchner, "Lattice basis reduction: Improving practical lattice basis reduction and solving subset sum problems," *Math. Programming*, Vol.66, pp.181-199, 1994.

[8] E. Viterbo and J. Boutros, "A universal lattice code decoder for fading channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.45, pp.1639 - 1642, July 1999.

[9] D. L. Ruyet, T. Bertozzi, and B. Özbek, "Breadth first algorithmsfor APP detectors over MIMO channels," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp.926 - 930, Jun. 2004

[10] U. Fincke and M. Pohst, "Improved methods for calculating vectors of short length in a lattice, including a complexity analysis," *Math. Comp.*, Vol.44, No.170, pp.463 - 471, Apr. 1985.

[11] M. Pohst, "On the computation of lattice vectors of minimal length, successive minima

and reduced bases with applications,” *SIGSAM Bull.*, Vol.15, No.1, pp.37 - 44, Feb. 1981.

- [12] Bakak Hassibi and Haris Vikalo, “On the Sphere-Decoding Algorithm I. Expected Complexity,” *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol.53, No.8, Aug. 2005.
- [13] M. O. Damen, H. El Gamal, and G. Caire, “On maximum-likelihood detection and the search for the closest lattice point,” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.49, No.10, pp.2389-2402, Oct. 2003.
- [14] Q. Liu and L. Yang, “A novel method for initial radius selection of Sphere Decoding,” in *Proc. IEEE VTC-Fall 2004*, Sep. 2004.
- [15] Z. Guo and P. Nilson, “Algorithm and Implementation of the K-best Sphere Decoding for MIMO detection,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.24, pp.491-503, March 2006.
- [16] K.-W. Wong, C.-Y. Tsui, R. S.-K. Cheng, and W.-H. Mow, “A VLSI architecture of a K-best lattice decoding algorithm for MIMO channels,” *IEEE ISCAS 2002*, May 2002.
- [17] D. L. Ruyet, T. Bertozzi, and B. Özbek, “Breadth first algorithms for APP detectors over MIMO channels,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp.926 - 930, Jun. 2004.
- [18] Y. L. de Jong and T. J. Willink, “Iterative tree search detection for MIMO wireless systems,” *IEEE VTC*, Sep. 2002.

현 트롱안 (Tronganh Huynh)

정회원



2004년 5월 호치민 공대 전기 및 전자공학과 학사
2007년 2월 경희대학교 전자-전파 공학과 석사
<관심분야> 이동통신 SoC설계

조 종 민 (Jongmin Cho)

준회원



2007년 2월 경희대학교 전자공학과 학사
2007년 3월~현재 경희대학교 전자-전파 공학과 석사 과정
<관심분야> 이동통신 SoC설계

김 진 상 (Jinsang Kim)

총신회원



1985년/1987년 2월 경희대 전자공학과 학사/석사
2000년 12월 미국 콜로라도주립대 전자공학박사
1990년~2001년 KT연구소
2001년~현재 경희대학교 전자정보학부 부교수

<관심분야> 영상처리 및 이동통신용 SoC 설계

조 원 경 (Won-Kyung Cho)

정회원



1986년 8월 한양대학교 전자공학과 공학박사
1980년~현재 경희대학교 전자정보학부 정교수
<관심분야> 컴퓨터시스템 구조, VLSI 설계