

논문 2005-42TC-7-10

다중 송수신 안테나 시스템 기반에서 오차 전달을 고려한 효율적인 K-BEST 복호화 알고리즘

(An Efficient K-BEST Lattice Decoding Algorithm Robust to
Error Propagation for MIMO Systems)

이 성 호*, 신 명 철**, 서 정 태***, 이 충 용**

(Sungho Lee, Myeongcheol Shin, Jeongtae Seo, and Chungyong Lee)

요 약

K-Best 알고리즘은 일정한 최대 복잡도를 가지기 때문에 ML (Maximum Likelihood) 수신기나 sphere decoding 수신기에 비해 실시간 구현에 적합한 알고리즘으로 알려져 있다. 그러나 ML 수신기에 가까운 성능을 내기 위해 충분히 큰 K값을 적용할 경우 여전히 높은 복잡도를 가지게 되며, 구현에 좀 더 적합하도록 작은 K값을 적용할 경우, 최대 복잡도는 낮아지는 반면 오차 전달(error propagation)에 의해 높은 SNR 영역에서 에러 플로링(error flooring)이 발생하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 이러한 오차 전달 문제를 해결하기 위해 각 레벨 별로 K값을 감소시키는 K-reduction 기법을 제안하였으며, 모의 실험을 통해 연산량 및 비트 오차 확률 측면에서 이득이 있음을 확인하였다.

Abstract

A K-Best algorithm is known as optimal for implementing the maximum-likelihood detector (MLD), since it has a fixed maximum complexity compared with the sphere decoding or the maximum-likelihood decoding algorithm. However the computational complexity of the K-Best algorithm is still prohibitively high for practical applications when K is large enough. If small value of K is used, the maximum complexity decreases but error flooring at high SNR is caused by error propagation. In this paper, a K-reduction scheme, which reduces K according to each search level, is proposed to solve error propagation problems. Simulations showed that the proposed scheme provides the improved performance in the bit error rate and also reduces the average complexity compared with the conventional scheme.

Keywords : MIMO, maximum-likelihood, K-Best, V-BLAST, error propagation

I. 서 론

최근 무선 통신 환경에서 고품질 및 고속의 데이터 전송이 요구됨에 따라, 한정된 주파수 자원 내에서 채널 용량을 증대하면서 높은 데이터 전송률을 제공할 수 있는 다중 송수신 안테나(Multiple Input Multiple

Output; MIMO) 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 MIMO 시스템에서 공간 다중화(spatial multiplexing)를 통해 송신 안테나 별로 각각 독립적인 심볼을 전송했을 경우, 수신단에서 수신 심볼로부터 송신 심볼을 검출해 내는 기법으로 선형 기법인 ZF(Zero Forcing), MMSE(Minimum Mean Square Error) 기법과 순차적 간섭 제거를 기반으로 한 V-BLAST 기법을 들 수 있으며, 최적의 수신 기법인 ML 기법과 sphere decoding 기법이 있다.

ZF, MMSE 기법은 선형 필터를 사용함으로써 낮은 복잡도를 제공하지만 ML 기법에 비해 상당한 성능 저하를 보이게 된다^[1]. 또한 복호화 순서 정렬과 순차적

* 학생회원, ** 정회원, 연세대학교
(Dept. of EE eng., Yonsei Univ.)

*** 정회원, 충주대학교
(Dept. of IC eng., Chungju Univ.)

※ 본 논문은 한국과학재단의 목적 기초 연구 사업
(R01-2002-000-00153-0)의 지원으로 수행되었습니다
접수일자: 2005년3월31일, 수정완료일: 2005년7월1일

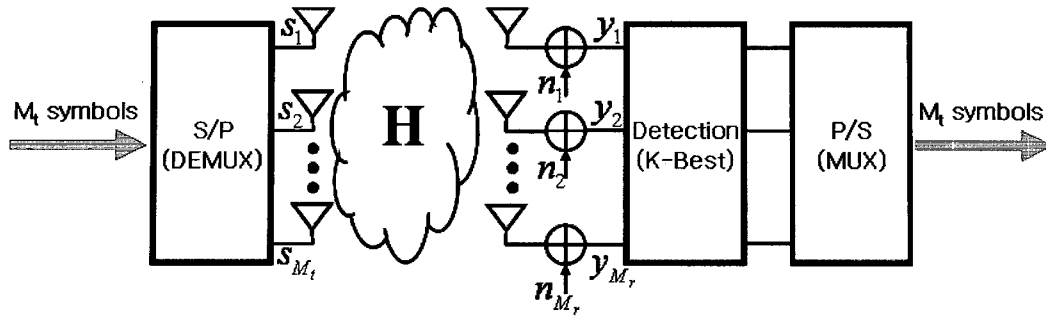


그림 1. 다중 송수신 안테나 시스템 모델
Fig. 1. Multiple input multiple output system model.

간섭 신호 제거 기술을 기반으로 한 V-BLAST 기법의 경우, 선형 기법 이상의 다이버시티 이득을 제공함에도 불구하고 여전히 ML 기법에 비해서는 성능 저하가 나타나게 된다^[2]. 이러한 기법들과 비교해서 ML 기법은 최대의 다이버시티 이득을 얻는 반면, 심볼 검출을 위해 전송 가능한 모든 경우의 심볼 벡터에 대해서 유클리디언 거리(Euclidean distance)를 계산, 비교해야 하므로 성상도의 크기를 Q , 송신 안테나의 수를 M_t 라 하면 Q^{M_t} 만큼의 유클리디언 거리 계산이 소요된다. 따라서 검출 복잡도가 송신 안테나의 수 M_t 에 대해 기하급수적으로 증가하게 되는 문제점이 있다. 이러한 이유 때문에 ML 수신기에 비해서 복잡도를 현저히 줄이면서 ML 수신기와 거의 같은 정도의 성능을 나타내는 sphere decoding 수신기가 제안되었다^[3]. Sphere decoding 알고리즘은 잡음 분산과 채널 상태를 고려해서 초기에 설정된 반경으로 이루어진 구 내에 존재하는 심볼 벡터셋에 대해서만 유클리디언 거리 계산이 수행되기 때문에 복잡도는 많이 감소되었지만 최대 복잡도가 잡음과 채널 환경에 따라 상당히 가변적이기 때문에 이러한 수신기를 실제 구현하는 데에는 여전히 어려움이 따른다고 할 수 있다.

최근 최대 복잡도가 고정되어 있어 실제 구현에 좀더 적합한 K-Best 알고리즘이 제안되었다^[4]. K-Best 알고리즘은 각 탐색 레벨에서 K개의 최적의 후보 심볼 셋만을 유지하는 방식으로, 기존의 ML 수신기에 비해 복잡도가 더 낮으면서 최대 복잡도를 예측할 수 없는 sphere decoding 수신기와 비교하여 최대 복잡도가 일정 수준으로 고정되어 있는 장점을 갖는다. 따라서 구현에 가장 적합한 알고리즘이라 할 수 있으며 K값이 충분히 크기만 하다면 ML 수신기에 가까운 성능을 제공한다. 그러나 작은 K값에 대해서는 복잡도가 낮아지는 반면 이전 레벨의 오차 전달에 의해 성능 저하가 발

생하며, 특히 높은 SNR 영역에서 심각한 에러 플로링 현상이 발생하게 된다.

본 논문에서는 실시간 구현에 적합하도록 작은 K값을 적용해서 K-Best 수신기 구성 시 오차 전달에 의해 에러 플로링이 발생하는 문제점을 해결하기 위해, 각 레벨 별로 K값을 감소시키는 K-reduction 기법을 제안하고자 한다. 제안된 K-reduction 기법을 적용한 결과 고정된 K값을 적용하는 경우와 유사한 최대 복잡도를 유지하면서 비트 오차 확률 측면에서 성능 개선이 있음을 모의 실험을 통해 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 제안 기법을 설명하기 위해 가정한 시스템 모델에 대해 알아보고, III장에서는 기존의 K-Best 기법에 대해 살펴본다. IV장에서 기존 기법의 문제점을 지적하고, K-reduction 알고리즘을 제안한다. V장에서 모의 실험을 통해서 제안된 기법의 성능을 기존 기법과 비교하며, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

그림 1에서와 같이 M_t 개의 송신 안테나와 M_r 개의 수신 안테나를 사용하는 MIMO 시스템을 고려한다. 채널 행렬은 zero-mean i.i.d(independent identically distributed) 복소 가우시안 성분을 갖는 $M_r \times M_t$ 의 순시 채널 모델 \mathbf{H} 로 가정한다. 각 심볼 주기마다 전송되는 송신 신호의 심볼 벡터를 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_{M_t}]^T$, zero-mean i.i.d 복소 가우시안 성분을 갖는 잡음 벡터를 \mathbf{n} 이라 하면, 수신 신호에 대한 심볼 벡터는 $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$ 으로 표현된다.

이러한 다중 송수신 안테나 시스템에서 실수로 이루어진 격자 구조 표현식을 얻기 위해 복소 행렬식

$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$ 을 다음과 같은 실수 행렬식 $\mathbf{r} = \mathbf{M}\mathbf{u} + \mathbf{w}$ 로의 전환 과정이 필요하다^[5].

$$\mathbf{r} = [\text{Re}\{\mathbf{y}^T\} \text{Im}\{\mathbf{y}^T\}]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = [\text{Re}\{\mathbf{s}^T\} \text{Im}\{\mathbf{s}^T\}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{\mathbf{H}\} & -\text{Im}\{\mathbf{H}\} \\ \text{Im}\{\mathbf{H}\} & \text{Re}\{\mathbf{H}\} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{w} = [\text{Re}\{\mathbf{n}^T\} \text{Im}\{\mathbf{n}^T\}]^T \quad (4)$$

채널 행렬 \mathbf{H} 의 각 성분들이 i.i.d 복소 가우시안 분포이기 때문에 $M_t \leq M_r$ 이라 할 때, (3)에서 표현된 행렬 \mathbf{M} 의 랭크는 $2M_t$ 가 되고 \mathbf{M} 의 $2M_t$ 개의 열벡터는 $2M_r$ 차원 공간에 놓여 있는 격자 구조의 기저 벡터를 이루게 된다. 따라서 송신 심볼 벡터를 실수와 허수 부분으로 나뉘서 표현한 \mathbf{u} 벡터는 실수로 표현된 격자 구조의 한 지점의 좌표로써 나타낼 수 있다. 예를 들면, 평균 심볼 에너지가 42인 64-QAM 변조 기법을 적용하였을 경우 $S_{64} = \{-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7\}$ 이라 하면 $\mathbf{u} \in S_{64}^{2M_t}$ 를 만족한다.

III. K-BEST 알고리즘

K-Best 알고리즘은 sphere decoding 알고리즘과 마찬가지로 ML 검출 기법에서 고려해야 할 심볼 벡터셋을 줄여보고자 제안된 기법이기 때문에 유클리디언 거리 계산이 수행되는 격자 구조의 범위를 수신 심볼 벡터를 중심으로 한 특정 반경 내의 구로 한정시키기 위해 우선 반경 \sqrt{C} 의 결정이 필요하다. ZF 기법을 적용하여 $\mathbf{p} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{r}$ 를 구한 후, \mathbf{p} 에 대해 양자화 과정을 거쳐서 추정된 심볼 벡터를 $\hat{\mathbf{p}}$ 라 하면 구의 초기 반경은 다음과 같이 결정된다.

$$C = \|\mathbf{r} - \mathbf{M}\hat{\mathbf{p}}\|^2 \quad (5)$$

또한 $\mathbf{G} = \mathbf{M}^T\mathbf{M}$ 이라 할 때, Cholesky factorization을 적용하면 상삼각 행렬 \mathbf{R} 을 이용해서 상삼각 행렬과 하삼각 행렬의 조합으로 $\mathbf{G} = \mathbf{R}^T\mathbf{R}$ 와 같이 다시 표현할 수 있다. 이 때, \mathbf{R} 의 성분인 r_{jk} 를 이용해서 새로운 상삼각 행렬 \mathbf{Q} 를 다음과 같이 정의한다. q_{jk} 는 행렬 \mathbf{Q} 의 각 성분에 해당하며 편의상 $2M_t = n$ 으로 표시한다.

$$\begin{aligned} q_{jj} &= r_{jj}^2 & \text{for } j = 1, \dots, n \\ q_{jk} &= r_{jk}/r_{jj} & \text{for } j = 1, \dots, n \text{ and} \\ & & k = j+1, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

최종적으로 추정하고자 하는 심볼 벡터를 $\hat{\mathbf{u}}$ 라 하면 최소 유클리디언 거리 계산을 통해 $\hat{\mathbf{u}}$ 를 결정하는 과정의 수식 전개는 다음과 같다. 이 때 \mathbf{e} 는 $\mathbf{e} = \mathbf{p} - \mathbf{u}$ 를 만족하는 벡터이다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{u}} &= \arg \min_{\mathbf{u}} \|\mathbf{r} - \mathbf{M}\mathbf{u}\|^2 = \arg \min_{\mathbf{u}} \|\mathbf{M}(\mathbf{p} - \mathbf{u})\|^2 \\ &= \arg \min_{\mathbf{u}} \|\mathbf{M}\mathbf{e}\|^2 = \arg \min_{\mathbf{u}} \|\mathbf{R}\mathbf{e}\|^2 \\ &= \arg \min_{\mathbf{u}} \sum_{i=1}^n q_{ii} \left(e_i + \sum_{j=i+1}^n q_{ij}e_j \right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

송신 심볼 벡터를 추정하기 위한 탐색은 n 번째 레벨에 있는 심볼셋에서부터 시작하는데 각 단계에서 부분 유클리디언 거리(partial Euclidean distance)를 계산해서 그 값이 가장 작은 것부터 K개의 후보 심볼셋을 취한 후 다음 단계로 이동하면서 심볼 검출이 이루어진다. 이 때 부분 유클리디언 거리 계산에는 다음 두 식이 사용된다.

$$S_i = p_i + \sum_{j=i+1}^n q_{ij}e_j \quad (8)$$

$$T_{i-1} = T_i - q_{ii}(S_i - u_i)^2 \quad (9)$$

식 (8)에서 S_i 는 ZF 기법에 의해 구한 \mathbf{p} 의 i 번째 성분 p_i 가 단계를 거듭하면서 보정된 값을 나타내며, 초기에 $S_n = p_n$ 으로 설정한다. 식 (9)에서 T_{i-1} 은 초기 반경과 이전 단계까지 구한 부분 유클리디언 거리의 차를 나타낸다. 초기에 $T_n = C$ 로 설정하며 각 단계에서 탐색이 진행되면서 계산한 부분 유클리디언 거리가 값에서 빼주게 되는데, 만약 T_{i-1} 이 음의 값을 갖는다면 이에 해당하는 후보 심볼은 고려 대상에서 제외되며 다음 단계로의 가지 확장을 멈추게 된다. K-Best 알고리즘의 심볼 검출 과정을 다음에서 요약 정리해 놓았다.

Step 1. 전처리 과정

각 레벨의 복호화 순서를 결정하고 Cholesky

factorization을 통해 \mathbf{Q} 의 성분들을 계산한다.

$\mathbf{p} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{r}$, $\hat{\mathbf{p}}$, $C = \|\mathbf{r} - \mathbf{M}\hat{\mathbf{p}}\|^2$ 에 대한 계산이 수행된다.

Step 2. 첫 번째 과정

A. $i = n$, $T_n = C$, $S_n = p_n$

B. 성상도에서 u_n 에 해당하는 각 심볼들에 대해 다음과 같이 계산을 수행한다.

$$D = T_n - q_{nn}(S_n - u_n)^2$$

$$T_{n-1} = \begin{cases} D, & D > 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

C. T_{n-1} 중 가장 값이 큰 것부터 양의 값을 갖는 K개를 택해서 이에 해당하는 후보 심볼셋들을 저장한다.

D. 선택한 각 심볼에 대해 다음 계산을 수행한다.

$$e_n = p_n - u_n$$

$$S_{n-1} = p_{n-1} + q_{n-1,n}e_n \quad (11)$$

Step 3. l 번째 과정

A. $i = i - 1$

B. 이전 단계에서 남겨진 K개의 심볼 벡터(partial symbol vector)를 고려해서 각각에 대응되는 현 단계의 u_i 에서 가능한 각 심볼들에 대해 다음과 같이 계산을 수행한다.

$$D = T_i - q_{ii}(S_i - u_i)^2$$

$$T_{i-1} = \begin{cases} D, & D > 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (12)$$

C. T_{i-1} 중 가장 값이 큰 것부터 양의 값을 갖는 K개를 택해서 이에 해당하는 후보 심볼셋들을 저장한다.

D. 선택한 각 심볼에 대해 다음 계산을 수행한다.

$$e_i = p_i - u_i$$

$$S_{i-1} = p_{i-1} + \sum_{j=i}^n q_{i-1,j}e_j \quad (13)$$

E. $i = 1$ 이 될 때까지 step 3을 반복하며 $i = 1$ 을 만족하면 이 때 구한 T_0 중 가장 큰 값에 대응되는 심볼 벡터가 최종적인 추정 심볼 벡터로 간주된다.

Sphere decoding 기법의 경우 트리 탐색(tree search)

방식에 있어서 깊이 우선 탐색(depth-first search) 방식이기 때문에 최대 복잡도를 예측할 수 없는 반면에 K-Best 알고리즘은 위에서 살펴 본 바와 같이 너비 우선 탐색(breadth-first search) 방식이기 때문에 최대 복잡도가 일정하여 실시간 구현에 더 적합한 알고리즘이라 할 수 있다. 모의 실험을 통한 결과를 살펴 보면, Rayleigh 페이딩 환경에서 4×4 안테나 시스템에 16-QAM 변조 기법을 적용할 경우 $K=16$ 이면 ML 수신기의 비트 오차 확률과 비교했을 때 거의 같은 정도의 성능을 나타낸다.

IV. 제안한 K-BEST 알고리즘

기존의 K-Best 알고리즘은 n 번째 탐색 레벨에서 1번째 탐색 레벨에 걸쳐 일정한 K값을 적용해서 심볼의 검출이 이루어지기 때문에 충분히 큰 K값에 대해서는 ML 수신기에 가까운 성능을 제공한다. 그러나 실시간 구현에 적합하도록 수신기의 복잡도를 줄이기 위해 보다 작은 K값을 적용하게 되면 전반적인 성능 저하가 나타나며, 특히 높은 SNR 영역에서는 심각한 에러 플로어링이 발생하는 문제점이 있다. 이러한 성능 저하의 원인은 V-BLAST 검출 기법의 원리를 이용하여 설명할 수 있다^[2]. V-BLAST 기법의 검출 방식은 첫 번째 단계에서 널링(nulling)을 통해 원하는 심볼을 검출해 내고, 이 검출한 심볼이 다음 단계에서 간섭 신호로 간주되어 제거(cancelling)되며 다시 널링을 통해 두 번째 심볼의 검출이 이루어지게 된다. 이러한 널링과 제거의 반복으로 최종 수신 심볼 벡터가 검출되는데, 이 때 첫 번째 심볼 검출 시 오차가 발생할 경우 심볼을 순서대로 검출하는 동안 오차 전달이 지속적으로 발생하여 최종적으로는 심각한 성능 저하를 불러 일으키게 된다. 따라서 V-BLAST 기법에서는 신뢰도를 높이기 위해 나중에 검출되는 신호보다 앞서 검출되는 신호의 수신 신호대 잡음비(post-detection signal to noise ratio)가 더 높도록 검출 순서를 정렬하는 과정이 선행된다.

본 논문에서는 이와 유사한 원리를 K-Best 검출 기법에 적용하였다. III장에서 언급한 알고리즘의 전처리 과정에서 심볼의 복호화 순서를 결정하는 부분을 고려하지 않는 경우를 우선 살펴 보면, K-best 알고리즘은 첫 번째 단계인 n 번째 탐색 레벨에서 취한 최적의 K개의 후보 심볼셋이 두 번째 단계인 $n-1$ 번째 탐색 레벨에서 K개의 후보 심볼셋을 결정하는데 영향을 미치게 된다. 이와 같은 방식으로 이전 단계의 i 번째 탐색

레벨에서의 K개의 후보 심볼셋이 다음 단계인 $i - 1$ 번째 탐색 레벨에서의 K개의 후보 심볼셋을 결정하는데 계속적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 V-BLAST 기법과 마찬가지로 초기에 검출된 부분 심볼셋에 오차가 발생할 경우, 다음 단계에서의 검출 과정을 수행하는데 있어서 지속적인 오차 전달을 유발하므로 모든 탐색 레벨에 일정한 K값을 적용하는 것보다 앞서 검출되는 탐색 레벨일수록 더 큰 K값을 할당하는 것이 효과적이라 할 수 있다. 제안한 K-Best 알고리즘은 첫 번째 탐색 레벨에서 적용되는 K값과 그 다음 단계로의 이동 과정에서 탐색 레벨 별 K의 감소율만 초기에 결정하면 되기 때문에 기존의 K-Best 알고리즘과 비교해서 추가적인 연산 없이 알고리즘을 수행할 수 있다.

제안한 K-Best 알고리즘의 심볼 검출 과정은 다음과 같다. 본 논문에서 초점을 맞추고 있는 것은 기존의 K-Best 기법과 동일한 수준의 최대 복잡도를 유지하면서 제안한 알고리즘을 통해 높은 SNR 영역에서 성능 개선 효과를 얻고자 하는 것이기 때문에 K값을 줄여나가는 것을 고려해서 알고리즘의 첫 번째 탐색 레벨에서 고정된 K값보다 큰 K값을 할당한다. 앞서 언급한 바와 같이 이전 단계의 탐색 레벨에서 잘 못 결정된 후보 심볼셋이 다음 단계 탐색 레벨에서의 후보 심볼셋 결정에 오차 전달을 불러 일으키기 때문에 보다 앞선 단계의 탐색 레벨일수록 큰 K값을 취하고 단계를 거듭할수록 K값을 점차 줄여나가는 방식이 가장 합리적이라 할 수 있다. 한 예로서 Rayleigh 페이딩 환경의 4×4 다중 송수신 안테나 시스템에서 64-QAM 변조 기법에 기존의 5-Best 기법을 적용한 것과 비교할 때, 제안한 기법의 경우 첫 단계의 탐색 레벨에서는 고정된 값인 5보다 큰 $K=8$ 을 취하고 다음 단계로의 이동 시 K값을 1씩 줄여나가게 되면 컴퓨터 모의 실험 결과를 통해 최대 복잡도가 거의 동일한 수준으로 유지되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 최대 복잡도가 동일하게 유지되는 두 기법을 적용하여 심볼 검출 시의 성능 평가와 복잡도 비교는 V장의 모의 실험 결과를 통해 나타나 있다.

지금까지는 K-Best 알고리즘의 전처리 과정에서 심볼의 복호화 순서를 고려하지 않은 경우를 살펴보았는데, V-BLAST 복호화 시 사용되는 정렬 기법을 전처리 과정에 적용하는 경우에도 제안한 알고리즘을 통해서 높은 SNR 영역에서 에러 플로링을 방지할 수 있다.

각 단계에서 K개의 후보 심볼셋을 결정하기 위해 V-BLAST 복호화 시 사용되는 정렬 기법을 적용하여 심볼 검출 순서를 정한다. 실수 행렬로 차원을 2배로

확장한 $n \times n$ 차원의 등가 채널 행렬을 \mathbf{M} 이라 하면, $k = n, n - 1, \dots, 1$ 에 대해서 다음과 같이 검출 순서를 결정하는 알고리즘을 반복해서 $\pi(k)$ 를 선택한다^[6].

$$\pi(k) = \arg \max_{j \in A_k} \left\{ \mathbf{m}_j^T \left[\mathbf{I} - \mathbf{M}_{k,j} (\mathbf{M}_{k,j}^T \mathbf{M}_{k,j})^{-1} \mathbf{M}_{k,j}^T \right] \mathbf{m}_j \right\} \quad (14)$$

여기에서 A_k 는 채널 행렬에 대한 열 인덱스 집합을 나타내고, $\mathbf{M}_{k,j}$ 는 $i \in A_k - \{j\}$ 를 만족하는 \mathbf{M} 의 열벡터 \mathbf{m}_i 로 구성된 $n \times (k - 1)$ 의 행렬이다. 위의 식을 통해 결정된 순서에 따라 채널 행렬의 열을 재배열해서 $\pi(n), \pi(n - 1), \dots, \pi(1)$ 의 순서로 심볼의 검출이 이루어지게 된다. 이러한 전처리 과정에 의해서도 BER 성능 개선이 이루어지지만 이와는 독립적으로, 앞선 탐색 레벨에서의 후보 심볼셋에 의한 오차 전달을 줄이기 위해 제안한 알고리즘을 적용함으로써 전처리 과정을 고려하지 않은 경우와 마찬가지로 높은 SNR 영역에서의 에러 플로링을 방지하는 효과를 얻을 수 있다. 여기에서는 $\pi(n)$ 번째 탐색 레벨에 가장 큰 K값을 적용하고 일정 비율로 K값을 줄여나가면서 $\pi(1)$ 번째 탐색 레벨까지 부분 유클리디언 거리 연산을 수행하면서 심볼 검출이 이루어진다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 앞서 결정된 후보 심볼셋에 의한 오차 전달을 줄이는 효과를 이용한 것이기 때문에 복호화 순서를 결정하기 위한 전처리

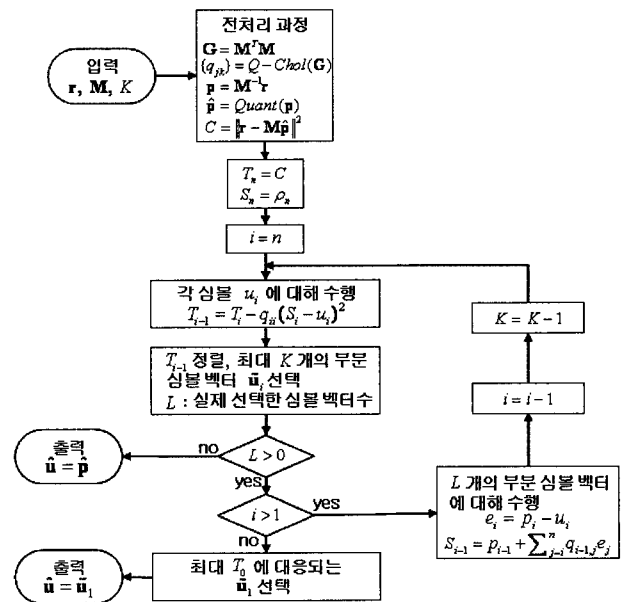


그림 2. K-reduction 알고리즘의 흐름도
Fig. 2. Flowchart of the K-reduction algorithm.

과정 수행 여부에 상관없이 높은 SNR 영역에서의 성능 개선을 제공하며, 또한 V장에서의 모의 실험을 통해 최대 복잡도를 동일한 수준으로 맞추더라도 평균 연산량 측면에서 다소 이득이 발생하는 것을 볼 수 있다.

그림 2는 K-reduction 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. "Q-chol"은 Cholesky factorization을 통해 입력 $\mathbf{M}^T \mathbf{M}$ 으로부터 III장에서 정의한 상삼각 행렬 \mathbf{Q} 를 출력하는 함수이고, "Quant"는 ZF 기법에 의해 양자화된 값을 출력하는 함수를 의미한다. $\tilde{\mathbf{u}}_i$ 는 i 번째 레벨부터 n 번째 레벨에 걸쳐 선택된 부분 심볼 벡터를 나타내고, L 은 실제로 선택한 부분 심볼 벡터의 개수를 의미한다.

V. 모의 실험 결과

본 논문에서 제안한 방법을 기존의 K-Best 기법과 비교하기 위해 다음과 같은 환경에서 모의 실험을 수행하였다. Rayleigh 페이딩 환경의 4×4 다중 송수신 안테나 시스템에서 64-QAM 변조 기법을 사용하여 4-Best, 5-Best 수신기의 성능과 비교하여 제안한 기법의 각 탐색 레벨 별 K값은 1씩 감소하도록 하였고, 최대 복잡도를 동일 수준으로 유지하기 위해 4-Best 기법과 비교할 알고리즘은 첫 번째 탐색 레벨에서의 초기 K값을 7로, 5-Best 기법과 비교할 알고리즘은 초기 K값을 8로 각각 설정하였다. 복잡도는 K-Best 알고리즘의 주요 연산이라 할 수 있는 부분 유클리디언 거리 계산에 소요되는 곱하기의 총개수를 통하여 측정하였다.

그림 3, 4는 각각 SNR이 20dB인 환경에서 기존의 4-Best, 5-Best 기법과 제안한 알고리즘의 순시 복잡도를 나타내는데 여기에서 K-reduction(7-1)은 첫 번째 탐색 레벨의 초기 K값이 7, 각 레벨 별 K의 감소율이 -1인 제안한 기법을 의미한다. 실험 결과를 통해 두 기법에서 최대 복잡도는 비슷한 수준으로 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 순시 연산량이 계속적으로 변화하는 양상을 볼 수 있는데, 이것은 모의 실험을 할 때 심볼 주기마다 채널과 잡음을 독립적으로 발생시킨 것에 기인한다. 즉, 채널 상태가 좋고 잡음 전력이 낮은 순간에는 각 탐색 레벨에서 최대로 취할 수 있는 K개보다 적은 개수의 부분 심볼 벡터를 취하기 때문에 연산량이 적게 나타나며, 채널 상태가 나쁘고 잡음 전력이 높은 경우에는 각 탐색 레벨에서 취할 수 있는 최대값인 K개 만큼의 부분 심볼 벡터를 취하기 때문에 연

산량이 최대로 나타나게 된다.

그림 5, 6은 각각 전처리 과정을 수행하지 않은 경우, 기존의 K-Best 기법과 제안한 기법의 SNR에 따른 성능 평가와 평균 복잡도를 나타낸다. 모의 실험 결과를 통해 28~34dB의 비교적 높은 SNR 영역에서 제안한 알고리즘이 기존의 K-Best 기법에서 발생하는 에러 플로어링을 어느 정도 방지할 수 있음을 알 수 있다. 특히 5-Best 기법과 비교했을 때 K-reduction(8-1) 기법은 10^{-3} BER을 기준으로 약 1dB의 SNR 이득이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 평균 연산량 측면에서도 측정된 전 SNR 영역에서 이득이 있었는데 18~22dB의 비교적 낮은 SNR 영역에서는 기존의 K-Best 기법에 비해 8~10%의 평균 연산량 감소 효과가 나타났다.

그림 7, 8은 각각 전처리 과정을 수행한 경우의 성능

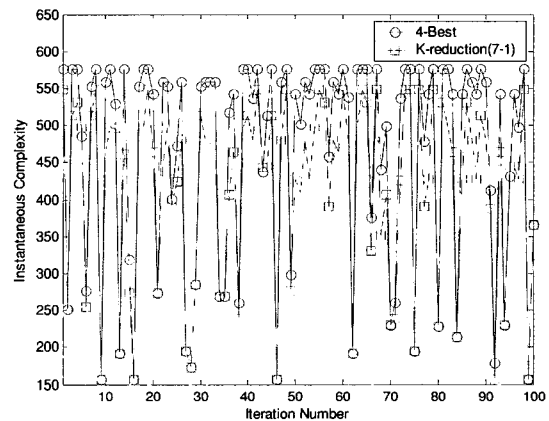


그림 3. 4-Best와 K-reduction(7-1)의 순시 복잡도
Fig. 3. Instantaneous complexity comparison of 4-Best vs. K-reduction(7-1).

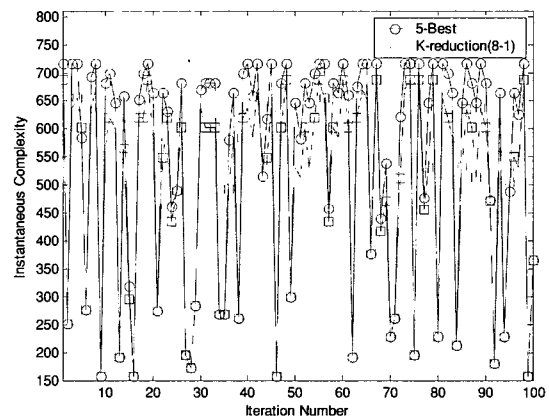


그림 4. 5-Best와 K-reduction(8-1)의 순시 복잡도 비교
Fig. 4. Instantaneous complexity comparison of 5-Best vs. K-reduction(8-1).

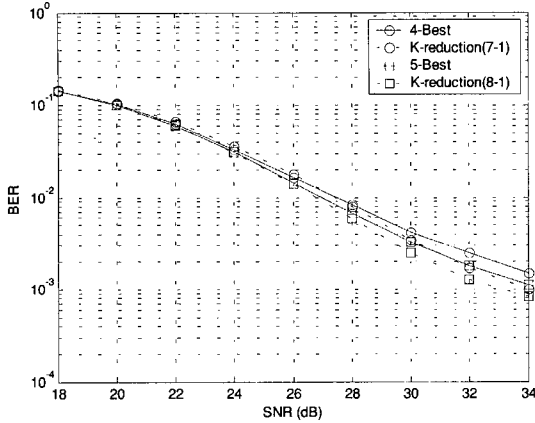


그림 5. K-Best와 K-reduction의 BER 성능 비교 (전처리 과정 생략)
 Fig. 5. Performance comparison of K-Best vs. K-reduction (no preprocessing).

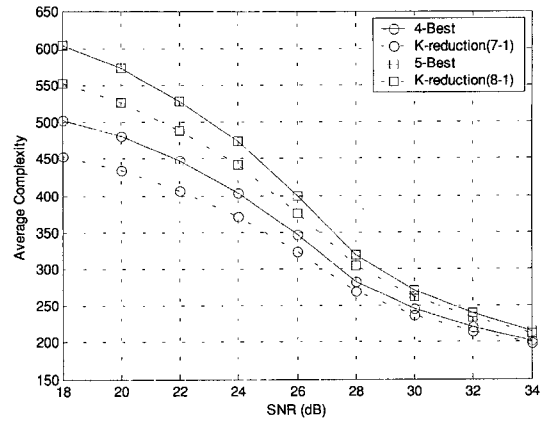


그림 6. K-Best와 K-reduction의 평균 복잡도 비교 (전처리 과정 생략)
 Fig. 6. Average complexity comparison of K-Best vs. K-reduction (no preprocessing).

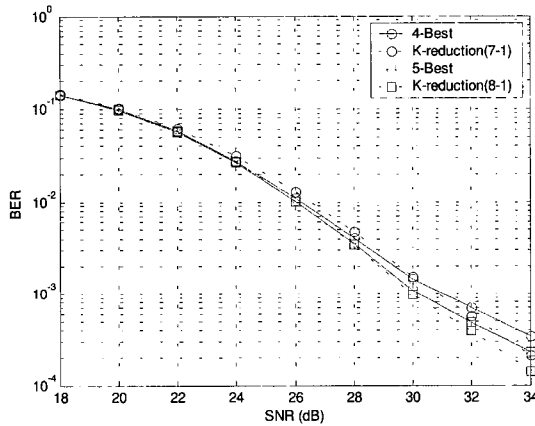


그림 7. K-Best와 K-reduction의 BER 성능 비교 (전처리 과정 수행)
 Fig. 7. Performance comparison of K-Best vs. K-reduction (preprocessing).

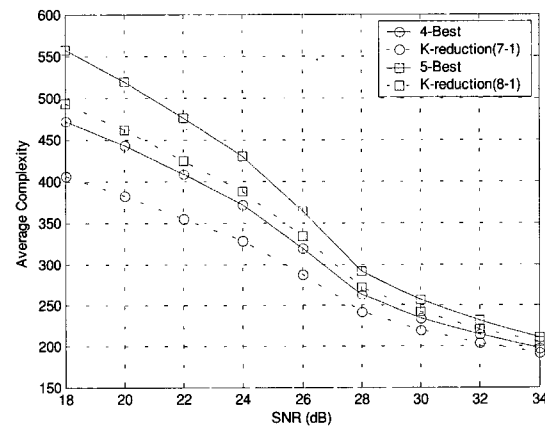


그림 8. K-Best와 K-reduction의 평균 복잡도 비교 (전처리 과정 수행)
 Fig. 8. Average complexity comparison of K-Best vs. K-reduction (preprocessing).

평가와 평균 복잡도를 나타낸다. 이 실험을 통해 전처리 과정 수행에 의한 성능 개선 이외에 제안한 알고리즘에 의해 높은 SNR 영역에서 추가적으로 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있으며 전처리 과정을 수행하지 않은 경우와 비교할 때, 평균 연산량 측면에서도 11~14%로 더 큰 폭의 감소 효과가 나타났다.

VI. 결 론

본 논문에서는 기존의 K-Best 기법에서 실제 구현을 고려해서 작은 K값을 적용했을 때 발생하는 높은 SNR 영역에서의 에러 플로잉 문제를 해결하기 위해 각 탐색 레벨 별로 오차 전달을 고려해서 다른 K값을 적용하는

기법을 제안하였다. 모의 실험을 통해 고정된 K-Best 기법과 비슷한 수준의 최대 복잡도를 유지하면서 첫 번째 탐색 레벨에 대한 초기 K값과 레벨에 따른 감소율만 결정하면 높은 SNR 영역에서 BER 성능 개선을 확인할 수 있었으며, 평균 연산량 측면에서도 이득이 발생하는 것을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, "Introduction to space-time wireless communications," Cambridge, U. K.: Cambridge Univ. Press, 2003.
 [2] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for

- realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in *Proc. 1998 URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics*, pp. 295-300, Sep. 1998.
- [3] E. Viterbo and J. Boutros, "A universal lattice code decoder for fading channels," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 45, pp. 1639-1642, July 1999.
- [4] K. Wong, C. Tsui, R. S. Cheng, and W. Mow, "A VLSI architecture of a K-best lattice decoding algorithm for MIMO channels," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, vol. 3, pp. III-273 - III-276, May 2002.
- [5] A. M. Chan and I. Lee, "A new reduced-complexity sphere decoder for multiple antenna systems," *IEEE Int. Conf. on Comm.* pp. 460-464, Apr. 2002.
- [6] M. O. Damen, H. E. Gamal, and G. Caire, "On maximum-likelihood detection and the search for the closest lattice point," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 49, pp. 2389-2402, Oct. 2003.

 저 자 소 개



이 성 호(학생회원)
 2004년 연세대학교 전기전자
 공학과 학사 졸업
 2004년~현재 연세대학교
 전기전자공학과 석사과정
 <주관심분야 : 통신신호처리,
 MIMO 시스템>



신 명 철(정회원)
 2001년 연세대학교 전기전자
 공학과 학사 졸업
 2003년 연세대학교 전기전자
 공학과 석사 졸업
 2003년~현재 연세대학교
 전기전자공학과 박사과정
 <주관심분야 : 통신신호처리, MIMO 시스템>



서 정 태(정회원)
 1985년 연세대학교 전자공학과
 학사 졸업
 1987년 연세대학교 전자공학과
 석사 졸업
 1988년~1990년 삼성전자 연구원
 1995년 연세대학교 전자공학과
 박사 졸업



이 충 용(정회원)
 1995년 Georgia Institute of
 Technology 박사 졸업.
 1996년~1997년 삼성전자 연구원
 1997년 9월~현재 연세대학교
 전기전자공학과 부교수
 <주관심분야 : 통신신호처리, 어레이 신호처리,
 MIMO 시스템>

2003년 Virginia Polytechnic Institute and State
 University Visiting Scholar
 1995년~현재 충주대학교 정보제어공학과 부교수
 <주관심분야 : Speech Processing, Speech
 Coding, MIMO>