

논문 2006-43TC-10-1

다중 송수신 안테나 시스템에서 적응 K-best 검출 알고리즘

(An Adaptive K-best detection algorithm for MIMO systems)

김 종 욱*, 강 지 원*, 이 충 용*

(Jongwook Kim, Jiwon Kang, and Chungyong Lee)

요 약

다중 송수신 안테나 시스템에서 비트 오류 확률 성능면에서 최적의 기법으로 알려진 ML(Maximum-Likelihood) 복호기를 구현하기 위해 격자 복호 기법이 제안되었다. 그러한 격자 복호 기법에 기반한 복호기에는 구 복호기, K-best 복호기 등이 있으며, K-best 검출 기법은 격자 복호 기법의 실제 구현에 가장 적합하지만 오차 전달 현상에 의한 성능 저하라는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 K-best 검출 기법의 단점을 보완해 비트 오류 확률 성능을 개선하고 평균 연산량을 낮춘 적응 K-best 기법을 제안하였다.

Abstract

Lattice decoding concept has been proposed for the implementation of the Maximum-Likelihood detection which is the optimal receiver from the viewpoint of the BER (Bit Error Rate) performance for MIMO (Multiple Input Multiple Output) systems. Sphere decoding algorithm and K-best decoding algorithm are based on the lattice decoding concept. A K-best decoding algorithm shows a good BER performance with relatively low complexity. However, with small K value, the error propagation effect severely degrades the performance. In this paper, we propose an adaptive K-best decoding algorithm which has lower average complexity and better BER performance than conventional K-best decoding algorithm.

Keywords: 다중 송수신 안테나 시스템, maximum-likelihood detection, K-best algorithm, 오차 전달 현상

I. 서 론

MIMO(Multiple input Multiple Output) 기술은 스캐터링이 풍부한 채널환경에서 송수신 안테나의 최소 개수에 따라 시스템의 용량이 거의 선형적으로 증가하므로 고속전송 및 높은 신뢰도를 필요로 하는 통신에 필수적이다^{[1][2][3]}. 스캐터링이 많은 환경 하에서 공간 다중화는 다수의 송수신 안테나를 사용하여 다수의 정보 심벌을 다양한 스캐터링 경로들로 전송하기 위한 독립적인 채널의 구성이 가능하므로 병렬 전송을 통해 데이터 용량을 증가시킬 수 있다. 이러한 상황에서 각 수신 안테

나에서 수신된 신호는 독립적인 페이딩을 겪는 서로 다른 송수신 안테나의 정보 신호들과 중첩된다. 다수의 정보 심벌을 검출하는 방법에는 ZF (Zero-Forcing), MMSE (Minimum Mean Square Error), ZF-DFE (Zero-Forcing Decision Feedback Equalizer), MMSE-DFE, V-BLAST 기법 등이 있다. 이러한 기법 중에서 V-BLAST 기법은 구현이 가능한 복호 복잡도로 좋은 성능을 나타내지만, nulling에 의한 잡음 증가와 간섭 제거에 의한 오류 전파로 인한 성능 열화를 갖는 단점이 있다. 수신 안테나에서 채널 상태 정보를 아는 경우, 최소 자승 오차 기준으로 최적의 성능을 제공하는 ML (Maximum Likelihood) 검출 기법은 다른 검출 기법들보다 훨씬 우수한 비트 오류 확률 성능을 갖지만, 변조 레벨과 송수신 안테나의 개수에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하므로 높은 변조 레벨과 다수의 송수신 안테나를 사용하는 시스템의 경우 실제 구현상의 어려움이 있다.

* 정희원, 연세대학교 전기전자공학과
(Dept. of EE eng., Yonsei Univ.)

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원 대학 IT연구센터 육성·지원사업의 연구 결과로 수행되었음

접수일자: 2006년7월12일, 수정완료일: 2006년10월2일

따라서 ML 검출 기법보다 낮은 복잡도를 가지면서 동일한 비트 오류 확률을 갖는 구 복호기 (Sphere Decoder)가 많은 분야에서 응용되고 있다^{[4][5]}. ML 검출 기법과는 달리 구 복호기의 탐색 공간은 수신 신호 벡터를 중심으로 특정 초기 반지름을 갖는 고차원 구 내부에 존재하는 격자 벡터(lattice vector)들로 국한된다. 만약 초기 반지름이 적어도 하나 이상의 격자 벡터가 고차원 구 내부에 포함되도록 설정되면 구 복호기는 항상 ML 검출 기법과 동일한 비트 오류 확률을 보장한다. 하지만 구 복호기는 채널 상황이 좋지 않아 초기 반지름이 넓게 설정된 경우 복잡도가 지수적으로 증가하므로 ML과 동일한 최대 연산량을 갖게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 K-best 검출 기법이 제안되었다^[6].

K-best 검출 기법은 각각의 탐색 레벨에서 부분 유클리드 거리를 계산해서 그 값이 작은 K개만 취하여 이에 해당하는 후보셋들을 상위 탐색 레벨로 가져가므로 고정된 최대 연산량을 가지며 실제 구현이 용이하다. II장에서 K-best 검출 기법에 대해 자세히 설명하도록 한다. 본 논문에서 사용되는 심볼중 쿼는 대문자는 행렬을, 쿼는 소문자는 벡터를 의미한다. 또 소문자의 sub-script i, j 는 원소를 의미하는데 예를 들어 행렬 M 에 대하여 $m_{i,j}$ 는 i 번째 행, j 번째 열의 원소를 의미하고, 벡터 m 에 대하여 m_i 는 i 번째 원소를 의미한다. 또한 대문자의 sub-script i 는 특정 process에서 갱신되는 인덱스 혹은 심볼 인덱스를 의미한다.

II. 본 론

1. 기존의 K-best 검출 알고리즘

송신 안테나에서 QAM (Quadrature Amplitude modulation) 성상을 갖는 심벌들을 M_t 개의 송신 안테나를 이용해서 동시에 전송하며, 송신 안테나 수보다 크거나 같은 M_r 개의 수신 안테나에서는 독립적인 신호들을 수신할 수 있다고 가정할 경우, 복소 수신 신호는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$y = Hs + n \quad (1)$$

식 (1)에서 s, y, H, n 은 각각 M_t 개의 송신 안테나로부터 전송된 심볼벡터, M_r 개의 수신 안테나로부터 수신된 심볼벡터, $M_r \times M_t$ 차원의 채널 행렬, 평균이 0인 복소 가우시안 잡음 벡터를 의미한다. 이후부터 편

의상 $2M_t = 2M_r = n$ 으로 가정한다.

페이딩 채널에서 수신 신호의 성상은 채널 행렬의 영향으로 인해 회전된 상태로 나타나게 된다. 격자 복호기는 고차원 공간 내에서 왜곡된 형태의 수신 신호 벡터와 가장 근접한 거리에 있는 심볼 벡터셋을 찾는 방법이다. 격자 복호기는 고차원 공간 내에 반경을 \sqrt{C} 로 갖는 고차원 구를 만들고 이 고차원 구 내에 존재하는 격자들에 대해서만 탐색을 한다^[7]. K-best 검출 알고리즘을 적용하기 위해 우선 실수 단위의 유클리드 거리 계산을 수행하기 위해 다중 송수신 안테나 시스템에서의 복소 행렬식 (1)을 실수 행렬식 $r = Mu + w$ 로 전환하는 과정이 선행된다.

$$r = [Re\{y^T\} \quad Im\{y^T\}]^T \quad (2)$$

$$u = [Re\{s^T\} \quad Im\{s^T\}]^T \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} Re\{H\} & -Im\{H\} \\ Im\{H\} & Re\{H\} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$w = [Re\{n^T\} \quad Im\{n^T\}]^T \quad (5)$$

$p = M^{-1}r, e = p - u, M^T M = R^T R$ 이라고 정의하자. 여기서 R 은 $M^T M$ 을 Cholesky factorization을 했을 경우 상삼각 행렬을 의미한다. 또 \hat{p} 을 p 의 ZF 추정치라 하고, 새로운 상삼각 행렬 Q 의 원소들은 행렬 R 의 원소들을 이용해 아래 식 (6)과 같이 정의된다.

$$q_{ii} = r_{ii}^2 \text{ for } i = 1, \dots, n$$

$$q_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ii}} \text{ for } i = 1, \dots, n, j = i + 1, \dots, n \quad (6)$$

$\|r - Mu\|^2$ 의 최소 유클리드 거리를 만족하는 벡터 u 를 찾는 문제는 아래 식 (7)과 같이 이해될 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{u} &= \underset{u}{\operatorname{argmin}} \|r - Mu\|^2 \\ &= \underset{u}{\operatorname{argmin}} \|M(p - u)\|^2 \\ &= \underset{u}{\operatorname{argmin}} \|Me\|^2 = \underset{u}{\operatorname{argmin}} \|Re\|^2 \\ &= \underset{u}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^j q_{ii} \left(e_{ii} + \sum_{j=i+1}^n q_{ij} e_j \right)^2 \\ &= \underset{u}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n D_i \end{aligned} \quad (7)$$

K-best 검출 기법에서는 반경 내에 위치한 격자들에 대해서만 탐색을 하므로 유클리드 거리 $\|r - Mu\|^2$

가 C 보다 큰 값을 갖는 격자들은 탐색을 하는 동안 버려지게 된다. 부분 유클리드 거리의 합이 C 보다 큰 값을 갖는 경우를 확인하기 위해 아래 식 (8)과 식 (9)가 사용된다.

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

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

초기 반경을 $T_n = C$ 로 설정하고, 상위 레벨로 탐색이 진행되는 동안 부분 유클리드 거리를 T_n 에서 빼준다. 만일 T_i 값이 음수가 되면 해당되는 경로는 탐색에서 제거된다. K-best 검출 기법의 알고리즘은 다음과 같다.

첫 번째 단계에서 $i = n$ 이므로 식 (9)를 이용해 n 번째 탐색 레벨의 가능한 모든 u_n 에 대해 부분 유클리드 거리를 계산해서 그 값이 작은 것부터 K개를, 즉 T_{n-1} 값이 양의 값을 갖는 것 중 큰 것부터 K개를 취하여 이에 해당하는 후보 심볼들을 저장한다. 두 번째 단계에서 $i = i-1$ 로 설정 후, 첫 번째 단계에서 저장한 K개의 후보 심볼셋 u_n 각각에 대해 $n-1$ 번째 탐색 레벨에서의 가능한 모든 u_{n-1} 을 이용해서 수식(9)를 계산한 후 T_{n-2} 값이 양의 값을 갖는 것 중 큰 것부터 K개를 택하여 이에 대응되는 부분 심볼 벡터를 저장한다. 이와 같은 과정을 $i = 1$ 이 될 때 까지 반복한 후, 마지막 단계에서 이전 단계의 K개의 부분 심볼 벡터셋 후보 각각에 대해 현 단계에서의 가능한 모든 u_1 을 적용해서 T_0 를 구한 후 이러한 T_0 값 중 가장 큰 값을 만족하는 전체 심볼 벡터가 최종적으로 검출된다.

하지만 K-best 검출 기법은 이전 탐색 단계에서 선택된 후보 벡터셋들이 현 탐색 단계에서 후보가 되는 부분 심볼 벡터셋을 결정하는데 영향을 미치는 순차적인 검출 방식을 채택한다. 따라서 이전 단계에서 잘못된 후보들을 선택하게 되면 다음 단계에서 후보 벡터셋들을 결정할 때 잘못된 정보를 전달하기 때문에 최종 단계까지 후보 벡터셋들을 결정하는데 있어서 지속적인 오차 전달 현상을 불러일으키게 된다. 이와 같은 오차 전달 문제는 비트 오류 확률 측면에서 성능 저하를 야기시킨다.

2. 제안하는 적응 K-best 검출 기법

기존의 K-best 검출 기법은 비해 고차원 구 내에 존

재하는 심볼에 대해서만 탐색을 하므로 ML 검출 기법에 비교할 때 연산량을 상당히 줄였으나, 채널 상황이 나쁘거나 잡음 전력이 커서 고차원 구의 초기 반지름이 크게 설정된 경우에는 고려하지 않아도 될 후보셋들이 사용되어 심볼 검출에 소요되는 평균 연산량이 증가하게 된다. 또 상기한 바와 같이 잘못된 후보를 선정했을 때 발생하는 오차 전달 현상으로 인해 비트 오류 확률 측면에서 성능 저하 문제가 발생한다.

본 논문에서는 오차 전달 현상으로 인한 비트 오류 확률을 줄이고, 심볼 검출에 소요되는 평균 연산량을 줄이고자 적응 K-best 검출 기법을 제안하였다. 적응 K-best 검출 기법은 채널 이득의 영향을 고려하여 채널 이득이 큰 탐색 레벨에서는 작은 값의 K를 사용하고, 채널 이득이 작은 탐색 레벨에서는 큰 값의 K를 사용하여 상위 탐색 레벨로 가져가는 후보 벡터셋의 수를 변화시키는 방법이다. 이렇게 채널 이득을 고려하여 후보 벡터셋의 수를 조절함으로써 기존의 K-best 검출 기법에 비해 오차 전달 현상에 의한 비트 오류 확률 성능 저하를 줄일 수 있으며, 심볼 검출에 소요되는 평균 연산량 또한 줄일 수 있다. 적응 K-best 검출 기법의 알고리즘은 다음과 같다.

먼저 각 탐색 레벨에서의 채널 이득에 해당하는 행렬 Q 의 대각성분에 대하여 평균값을 구한다.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{ii} = a \quad (10)$$

이렇게 구해진 평균값(a)으로 각 탐색 레벨별로 해당되는 q_{ii} 에 나누어 구한 값을 비교하여 그 값의 크기에 따라 해당 탐색 레벨에서 사용하는 K의 값을 다르게 적용한다. 행렬 Q 의 대각성분에 대해 평균값을 취하는 이유는 채널 이득의 분산이 큰 경우에도 각 탐색 레벨별로 상대적인 채널 이득을 보고 K값이 변하기 때문에 신뢰할 수 있는 비트 오차 확률 성능과 평균 연산량 감소를 보장하기 때문이다.

본 논문에서는 $\frac{q_{ii}}{a} < 0.2$ 이면 $K=8$, $0.2 \leq \frac{q_{ii}}{a} < 2.0$ 이면 $K=3$, $2.0 \leq \frac{q_{ii}}{a}$ 이면 $K=1$ 을 적용하였다. K값을 적용하는 범위는 모의실험을 통해 구하였으며, 비트 오류 확률과 연산량은 K값의 크기에 따라 트레이드오프 관계에 있기 때문에 다른 K값을 적용하는 범위나 바뀌는 K값은 요구되는 비트 오차 확률 성능과 연산량을 고려하여 조절할 수 있다. 아래에서 적응 K-best 검출 기법

의 알고리즘에 대해 기술하였다.

가. 초기화 단계

각 탐색 레벨의 복호화 순서를 결정하고 Q, p, C 에 대한 계산을 수행한다.

나. 첫번째 과정

$$(1) i = n, T_n = C, S_n = p_n, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{ii} = a$$

$$(2) \frac{q_{ii}}{a} < 0.2 \text{ 이면 } K=8, 0.2 \leq \frac{q_{ii}}{a} < 2.0 \text{ 이면 } K=3,$$

$$2.0 \leq \frac{q_{ii}}{a} \text{ 이면 } K=1 \text{ 을 적용한다.}$$

(3) 모든 가능한 u_n 에 대해 다음 계산을 수행한다.

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

$$T_{n-1} = \begin{cases} D, & D > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

(4) 양의 값을 갖는 T_{n-1} 중 값이 큰 것부터 최대 K개를 택해서 이에 해당하는 후보 심볼셋들을 저장한다.

(5) 선택된 각 심볼에 대해 다음 계산을 수행한다.

$$e_n = p_n - u_n \quad S_{n-1} = p_{n-1} + q_{n-1,n}e_n \quad (12)$$

다. 반복 과정

$$(1) i = i - 1$$

$$(2) \frac{q_{ii}}{a} < 0.2 \text{ 이면 } K=8, 0.2 \leq \frac{q_{ii}}{a} < 2.0 \text{ 이면 } K=3,$$

$$2.0 \leq \frac{q_{ii}}{a} \text{ 이면 } K=1 \text{ 을 적용한다.}$$

(3) 이전 단계에서 선택된 K개의 부분 심볼 벡터 각각에 대해 현 단계에서 가능한 모든 u_i 를 대입해서 다음 계산을 수행한다.

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

$$T_{i-1} = \begin{cases} D, & D > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

(4) 양의 값을 갖는 T_{i-1} 중 값이 큰 것부터 최대 K개를 택해서 이에 해당하는 부분 심볼 벡터셋 후보들을 저장한다.

(5) 선택된 각 심볼에 대해 다음 계산을 수행한다.

$$e_i = p_i - u_i$$

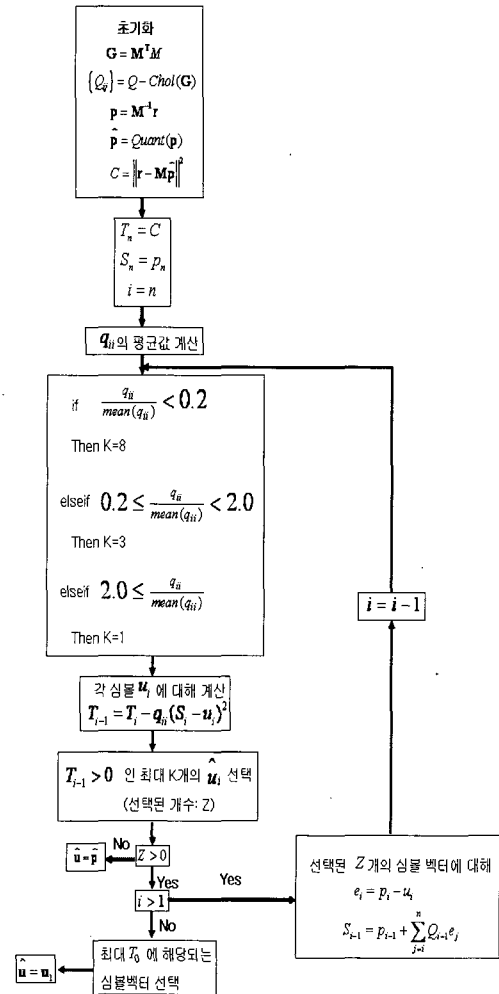


그림 1. 적응 K-best 검출 기법의 흐름도
Fig. 1. Flowchart of the proposed adaptive K-best algorithm.

$$S_{i-1} = p_{i-1} + \sum_{j=1}^n q_{i-1,j} e_j \quad (14)$$

(6) $i = 1$ 이 될 때까지 과정 다.를 반복하여 최종적으로 구한 T_0 중 가장 큰 값에 대응되는 전체 심볼 벡터를 검출한다. 그림 1은 논문에서 제안하는 적응 K-best 검출 기법에 대한 흐름도이다.

상기한 바와 같이 적응 K-best 검출 기법을 적용한 기술은 기존의 K-best 검출 기법에 비해 채널 이득의 영향을 고려하여 탐색 레벨별로 K값을 다르게 적용하므로 심볼 검출에 소요되는 평균 연산량을 감소시키는 효과가 있다. 또한 채널 이득이 낮은 탐색 레벨에서는 높은 K값을 적용하므로 오차 전달 현상을 줄여 비트 오차 확률 측면에서도 성능을 향상시킨다.

III. 모의 실험

모의실험을 위해 공간 다중화 기법을 적용한 송수신 안테나가 각각 4개인 다중 송수신 안테나 시스템을 고려하였으며, 16-QAM 변조기법을 사용하였다. 채널 환경은 백색 가우시안 잡음 채널을 가정하였으며, 기존의 5-best, 6-best 검출 기법과 비교하기 위해 본 논문에서는 8-3-1 적응 K-best 검출 기법을 사용하였다.

그림 2 및 그림 3은 본 논문에서 제안한 기술을 사용하는 적응 K-best 검출 기법과 기존의 K-best 검출 기법의 비트 오류 확률 성능 및 평균 연산량을 비교한 결과이다. 여기서 평균 연산량은 K-best 검출 과정의 주요 연산이라 할 수 있는 부분 유클리디언 거리 계산에 소요되는 곱하기 개수의 총합을 측정한 것이다.

그림 2는 신호대 잡음비에 따른 비트 오류 확률을 나타낸 것인데 8-3-1 적응 K-best 검출 기법의 경우 낮

은 채널 이득에서 높은 K를 사용하는 기술로 인해 높은 오차 전달 현상을 줄여 비트 기존의 K-best 기법에 비해 오류 확률이 줄어드는 효과가 있는 것을 확인할 수 있다. 10^{-3} 의 비트 오류 확률 기준으로 했을 때 8-3-1적응 K-best 검출 기법을 적용한 경우 4-best 검출 기법에 비해서 3dB 정도의 이득이 발생하며, 또한 그림 3의 평균 연산량 비교시 4-best에 비해 2~10%정도 감소하였다. 5-best 검출 기법과 비교시 약 1.4dB의 이득이 발생하며, 또한 평균 연산량은 2~23%정도 감소하였으며, 6-best 검출 기법과 비교시 거의 동일한 비트 오류 확률 성능을 보이나 평균 연산량은 2~33%정도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4 및 그림 5는 8-3-1 적응 K-best 검출 기법과 8-2-1 적응 K-best 검출 기법의 비트 오류 확률과 평균 연산량을 비교한 그래프이다. 그림 4를 살펴보면

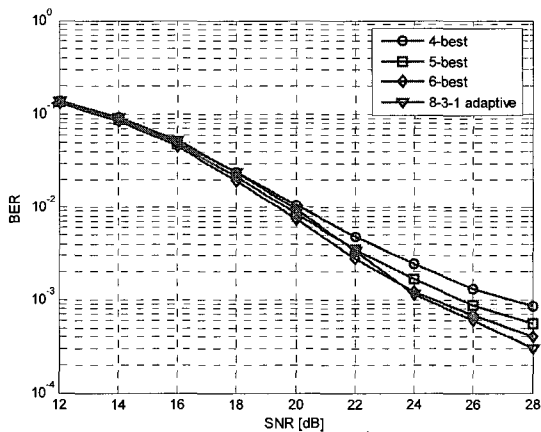


그림 2. 신호대 잡음비에 따른 비트 오류 확률
Fig. 2. Bit error rate according to the SNR.

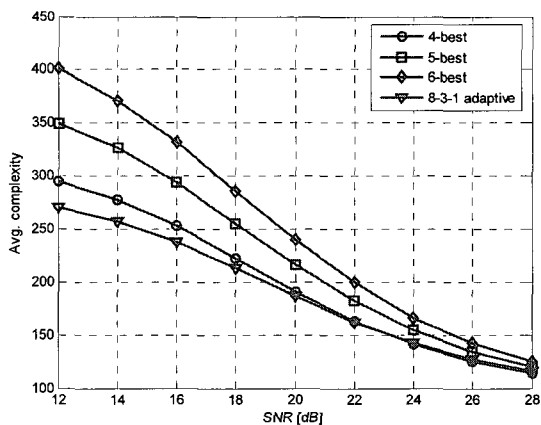


그림 3. 신호대 잡음비에 따른 평균 연산량
Fig. 3. average complexity according to the SNR.

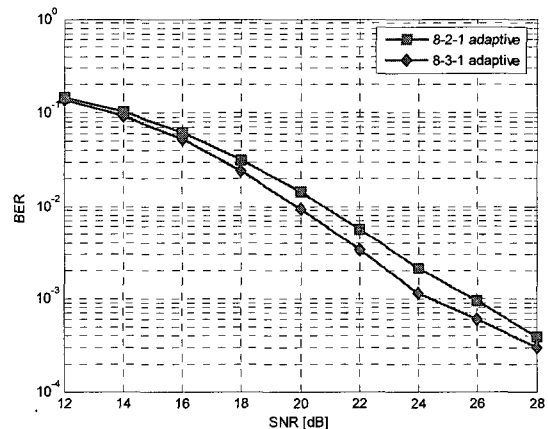


그림 4. 적용된 K값에 따른 비트 오류 확률
Fig. 4. Bit Error Rate according to the applied K value.

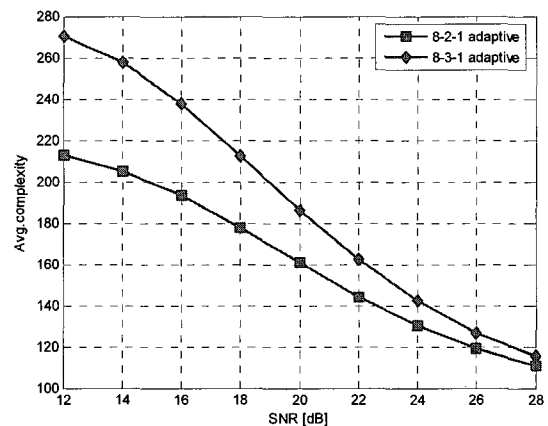


그림 5. 적용된 K값에 따른 평균 연산량
Fig. 5. average complexity according to the applied K value.

8-2-1 적응 K-best 검출 기법은 8-3-1 적응 K-best 검출 기법에 비해 10^{-3} 비트 오류 확률을 기준으로 2dB 정도의 성능 차이가 발생하지만 그림 5에서 보는 바와 같이 평균 연산량은 8-3-1 적응 K-best 기법에 비해 3~22% 정도 감소한다.

IV. 결 론

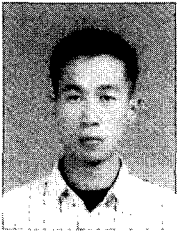
본 논문에서는 채널 이득을 고려하여 탐색 레벨별로 다른 K값을 적용하는 적응 K-best 검출 기법을 제안하고, 기존의 K-best 기법과 비트 오류 확률 및 평균 연산량 측면에서 성능을 비교하였다. 제안된 기법은 행렬 Q 의 대각 성분들에 대해 평균을 구하고, 각각의 탐색 레벨에 해당되는 대각성분 q_{ii} 를 평균값으로 나누어 그 크기에 따라 탐색 레벨별로 다른 K값을 적용해 탐색을 하는 방법이다.

본 논문에서 제안한 적응 K-best 검출 기법을 사용하면 채널 이득이 나쁜 탐색레벨에서는 큰 K값을 사용하고 채널 이득이 높은 탐색 레벨에서는 작은 K값을 사용하여 기존의 K-best 검출 기법에 비해 오차 전달 현상에 의한 비트 오류 확률 성능 저하를 줄이며, 심볼 검출에 소요되는 평균 연산량 또한 감소시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," Bell Labs Technical Journal, pp. 41-59, Oct 1996.
- [2] G. J. Fochini and M. J. Gans, "On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple anetnnas," Wireless Personal Communication, vol. 6, no. 3, pp. 311-335, Mar 1998.
- [3] A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communication, Cambridge University press, 2003.
- [4] U. Fincke and M. Pohst, "Improved methods for calculating vectors of short length in a lattice, including a complexity analysis," Math, Comput., vol. 44, pp. 463-471, Apr 1985.
- [5] E. Viterbo and J. Boutros, "A universal lattice code decoder for fading channels," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 45, no. 5, pp. 1639-1642, July 1999.
- [6] Kwan Wai Wong, Chi-Ying Tsui, Roger S Cheng, Wai Ho Mow, "Reduced-complexity Maximum Likelihood lattice decoder for MIMO channels," in the Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Communications, pp. 213-216, 2001.
- [7] Kwari Wai Wong, Chi-Ying Tsui, Roger S Cheng, Wai Ho Mow, "A VLSI Architecture of A K-best Lattice Decoding Algorithm for MIMO channels," in IEEE International Symposium on volume 3, pp. 26-29 May 2002.

저 자 소 개



김 종 욱(정회원)
 2002년 3월 육군사관학교
 전자공학과 학사
 2005년 3월 ~현재 연세대학교
 전기전자공학과 석사과정
 <주관심분야 : 통신 신호처리,
 MIMO 시스템>



이 충 용(정회원)
 1995년 Georgia Institute of
 Technology 박사
 1996년~1997년 삼성전자 연구원
 1997년 9월~현재 연세대학교
 전기전자공학과 교수

<주관심분야 : 통신신호처리, 어레이 신호처리,
 MIMO 시스템>



강 지 원(정회원)
 2003년 2월 연세대학교
 전기전자공학과 학사
 2005년 2월 연세대학교
 전기전자공학과 석사
 2005년 3월~현재 연세대학교
 전기전자공학과 박사과정
 <주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO 시스템>