

논문 2008-45TC-12-12

코드북을 이용한 동 이득 전송 빔포밍 시스템에서 빠른 인덱스 탐색 기법

(A Fast Index Search Algorithm for Codebook-based Equal Gain
Transmission Beamforming System)

박 노 윤*, 김 영 주**, 이 신*, 이 관 섭*

(Noe Yoon Park, Young Ju Kim, Xun Li, and Kwan Seob Lee)

요 약

코드북을 이용하는 동 이득 전송 시스템에서 빠른 인덱스 탐색기법을 제안한다. 새로운 간단한 매트릭을 이용하여 빠르게 rough 탐색을 하여 몇 개의 후보 가중치 벡터들을 선택하고, 선택된 벡터들에 기존의 개념을 적용하는 accurate 탐색을 하여 최적의 가중치 벡터를 결정한다. 제안하는 기법은 송신 안테나 수가 2개, 3개일 경우 기존의 방법에 비해 탐색 시간이 반 이하로 줄어들면서, 링크 레벨 성능은 거의 동일하게 유지된다. 또한 코드북 크기가 커질수록 탐색시간이 기존의 방식에 비해 현저히 감소한다

Abstract

Simple but effective fast codebook searching algorithms for quantized EGT(equal gain transmission) are presented. Using newly defined metric, rough searching selects a few candidate weight vectors. Using the conventional metric, accurate searching determines the optimal vector among the candidates. This strategy reduces the entire searching time. When the number of transmit antenna is two or three, the searching time reduces more than a half less than the conventional searching time. Moreover, the more the size of codebook increases, the more the searching time reduction also increases.

Keywords: Closed-loop MIMO, Beamforming, Codebook, EGT, Index searching

I. 서 론

WiMAX, WiBro 그리고 LTE 시스템들은 다중 안테나를 이용한 다이버시티 기법을 구현하고 있으며, 크게 2가지 범주로 구분된다. Space time block code(STBC), 공간 다이버시티(spatial diversity)처럼 채널 피드백 없이 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 open-loop MIMO

시스템과 수신단에서 추정된 채널 정보를 피드백하여 다이버시티 이득을 얻는 closed-loop MIMO 시스템이다^[1].

Closed-loop MIMO 시스템에서는 상향링크 대역폭을 적게 차지하면서 이러한 피드백 과정을 수행하기 위해 크게 5 가지의 방법들을 이용하는데, 그 중 한 가지 방법이 임의로 양자화된 다수의 채널 상태 정보가 N 개의 벡터 인덱스로 구성된 코드북에서 최적의 벡터 인덱스를 선택하여 이를 송신측에 피드백하는 것이다^[2]. 이 때, 적은 비트수의 피드백으로도 거의 최적의 성능을 얻을 수 있다. 기본적으로 코드북의 크기가 커지면 이상적인 성능에 근접하나, 최적의 벡터 인덱스 탐색

* 학생회원, ** 정회원, 충북대학교 정보통신공학과
(Division of Information & Communication Engineering,
Chungbuk National Univ.)

※ "이 논문 또는 저서는 2008년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임" (지역거점연구단육성사업 / 충북BIT연구중심대학육성사업단)

접수일자: 2008년8월8일, 수정완료일: 2008년12월10일

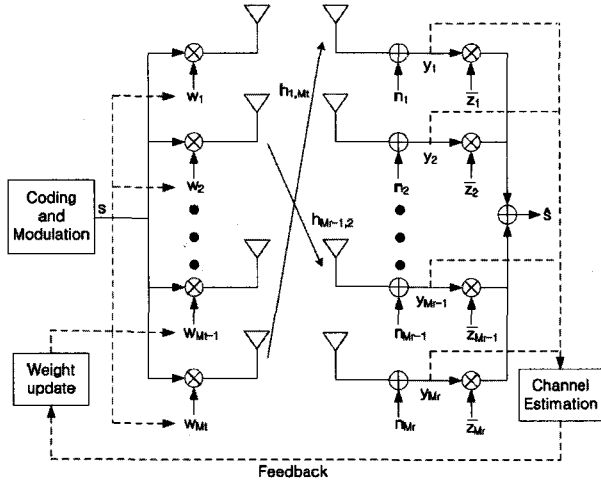


그림 1. MIMO 빔포밍과 combining 시스템에 대한 블록 다이어그램

Fig. 1. Block diagram of MIMO beamforming and combining system.

시간이 선형적으로 증가하는 문제가 발생한다. 따라서 기존 벡터 인덱스탐색 기법보다 빠른 새로운 벡터 인덱스 탐색 기법에 대한 연구가 필요하다^[3].

본 논문에서는 기존의 벡터 인덱스 탐색 기법 보다 계산량은 줄어들면서 시스템 성능차이가 거의 나지 않는 새로운 빠른 인덱스 탐색기법을 제안한다. 이 새로운 탐색기법을 동 이득 전송(equal gain transmission, EGT) 빔포밍 시스템^[4-5]에 적용하여 성능을 측정하고, 플랫 페이딩 채널을 갖는 EGT 빔포밍 시스템에서 기존의 벡터 인덱스 탐색기법과 성능을 비교, 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장은 기존의 EGT 코드북 탐색 기법을 정리한다. III장은 새롭게 제안된 빠른 벡터 인덱스 탐색기법을 기술한다. IV장에서는 컴퓨터 시뮬레이션으로 본 논문에서 제안된 방식의 성능을 검증한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

그림 1은 송신 안테나 수를 M_t , 수신 안테나 수를 M_r 이라 할 때, MIMO 빔포밍 송수신 시스템에서 채널 상태 정보(channel states information, CSI)의 피드백 과정을 나타낸 것이다.

입력 신호 s 는 l 번째 ($1 \leq l \leq M_t$) 송신 안테나 가중치 w_l 과 곱을 통해 전송된다. k 번째 ($1 \leq k \leq M_r$) 수신 안테나에 의해 수신된 신호 y_k 는 식 (1)과 같다^[6].

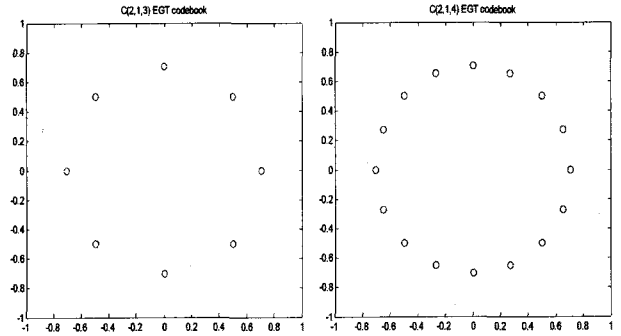


그림 2. 복소평면 상에서의 EGT 코드북 C(2,1,3), C(2,1,4)

Fig. 2. EGT codebook C(2,1,3), C(2,1,4) on complex number plane.

$$y_k = \left(\sum_{l=1}^{M_t} h_{k,l} w_l \right) s + n_k \tag{1}$$

$h_{k,l}$ 은 memoryless 페이딩 채널이며, n_k 는 k 번째 수신 안테나에서의 AWGN 잡음이다. 수신된 신호 y_k 는 k 번째 수신 안테나 가중치 z_k^* 와 곱을 통해 \hat{s} 신호를 combining 할 수 있다(*는 conjugation을 의미). 이를 행렬 표기법으로 나타내면 다음과 같다^[6].

$$\hat{s} = (z^H H w) s + z^H n \tag{2}$$

이 때, 채널 H 는 $M_r \times M_t$ 크기를 갖는 페이딩 채널 매트릭스이며, 송신측 가중치 벡터와 잡음은 각각 $w = [w_1 \dots w_{M_t}]^T$, $n = [n_1 \dots n_{M_r}]^T$ 이다. 그리고 수신측 가중치 벡터는 $z = [z_1 \dots z_{M_r}]^T$ 이다. T 는 transposition, H 는 conjugate transposition을 의미한다.

수신기에서 채널 상태 정보를 완벽히 추정했다고 가정하면 추정된 채널 상태 정보는 송신단으로 피드백이 이루어져, 새로운 가중치 벡터 w 를 업데이트 하는데 사용된다. 이때 상향링크 대역폭을 적게 사용하기 위해 L bits 크기의 벡터 인덱스를 가지는 양자화된 코드북을 사용한다. 각 코드북들은 생성 효율성 및 저장 메모리에 최적화되어 있으며, 송·수신기 모두 동일한 코드북을 가지고 있다^[7].

EGT 빔포밍 시스템에서 채널 상태 정보를 피드백하기 위해 본 논문에서 사용되는 코드북은 [6]에서 제안된 6가지의 단계를 통해 생성된다^[6]. 그림 2는 생성된 코드북들을 좌표평면 상에 나타낸 것이다.

표 1은 각 단계를 거쳐 생성된 코드북들의 크기를 정리한 것이다. 코드북 생성 시 사용되는 계수로서 위상

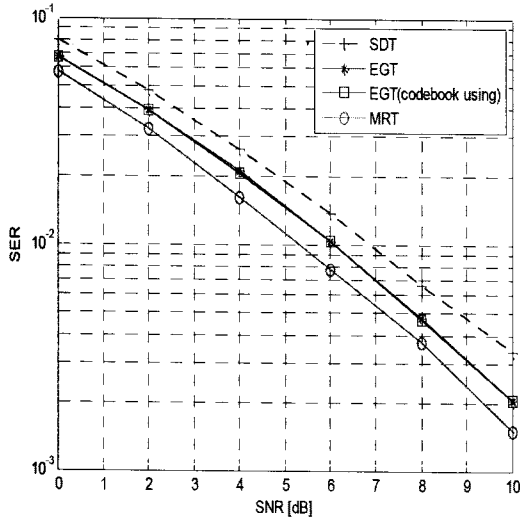


그림 3. EGT, SDT, MRT 그리고 EGT codebook을 이용한 2x1 시스템에서의 평균 에러 발생 확률
 Fig. 3. Average probability of symbol error for 2x1 systems using EGT, SDT, MRT and EGT codebooks.

을 코드화시키기 위해 [6]에서 사용된 B bits를 이용하여 생성된 각각의 전체 코드북들의 벡터 인덱스 수 N 과 이를 코드로 표기하기 위해 필요한 비트의 수인 L 을 나타낸다.

기술상의 편의를 위해 코드북에 대한 표기법을 $C(M_t, M_r, L)$ 로 정의한다. $L = 3$ 이면 3 bits 피드백, $L = 6$ 이면 6 bits 피드백이 이루어지는데, 2^L 은 각각의 코드북에서 각 송신 안테나에 대한 벡터 인덱스들의 전체 수, N 과 같다. 예를 들어 $C(3, 1, 6)$ 의 경우 $N = 64$ 이다.

식 (2)를 이용한 EGT 빔포밍 시스템에서 오류 발생 확률을 최소화하기 위해 즉, 최적의 성능을 얻기 위해 \mathbf{w} 와 \mathbf{z} 를 적절히 선택해야 한다. 이때, \mathbf{w} 와 \mathbf{z} 는 아래의 식과 같고, ψ , ϕ 는 임의의 위상에 대한 각도이다^[6].

$$\mathbf{w} = \frac{1}{\sqrt{M_t}} e^{j\psi}, \quad \psi \in [0, 2\pi) \quad (3)$$

$$\mathbf{z} = \frac{1}{\sqrt{M_r}} e^{j(\phi + \text{phase}(\mathbf{H}\mathbf{w}))}, \quad \phi \in [0, 2\pi) \quad (4)$$

EGT 빔포밍 시스템 코드북에서 각 벡터 인덱스에 해당하는 가중치 벡터 값들은 N 개의 \mathbf{w} 값을 각각 의미한다. 최적의 \mathbf{w} 와 \mathbf{z} 를 선택하기 위해서는 EGT 코드북 벡터 인덱스 $k = 1, \dots, N$ 에서 식 (5)를 만족하는 EGT 코드북 벡터 인덱스 k_{opt} 를 선택하면 된다^[6]. 이 때, $\|\cdot\|_1$ 은 1-norm을 의미한다.

표 1. EGT 코드북 크기

Table 1. EGT codebook size, N/L .

	$B=2$	$B=3$	$B=4$
$M_t=2, M_r=1$	4/2	8/3	16/4
$M_t=3, M_r=1$	16/4	64/6	256/8
$M_t=4, M_r=1$	64/6	512/9	4096/12

$$k_{opt} = \arg \max_{k \in 2^L} |\mathbf{H}\mathbf{w}(k)|_1 \quad (5)$$

식 (5)에 의해 L bits의 벡터 인덱스 k_{opt} 를 선택하면 그림 1과 같이 송신단으로 피드백이 이루어지게 된다. 즉, 채널 \mathbf{H} 를 추정할 때마다 식 (5)를 통해 최적의 벡터 인덱스를 탐색하여 피드백한다. 그림 3은 $M_t = 2, M_r = 1$ 일 때, 여러 가지 다이버시티 기법을 비교한 것으로 코드북을 이용한 EGT 빔포밍 시스템은 이상적인 EGT 빔포밍 시스템과 성능이 거의 동일함을 알 수 있다.

이처럼 코드북을 이용한 EGT 빔포밍 시스템은 L bits의 피드백을 통해서도 무한대 대역의 피드백을 가정하는 이상적인 EGT 성능과 큰 차이가 발생하지 않는다는 장점이 있다. 그러나 표 1에서 보는 것과 같이 B 가 증가할수록 코드북 크기가 커져 탐색시간이 선형적으로 증가하여 탐색시간 또한 증가하게 되는 단점이 발생한다.

III. 빠른 인덱스 탐색 기법

EGT 시스템에서 새로운 빠른 인덱스 탐색기법은 전체 벡터 인덱스에서 4단계로 이루어져 후보 가중치 벡터(candidate weight vector)들을 선택하는 rough 탐색 기법과 후보 가중치 벡터들에서 수행하는 accurate 탐색 기법으로 이루어진다.

후보 가중치 벡터들의 수를 빠른 탐색 기법에서의 인덱스 수(number of fast search indices, NFSI)라 정의하면, NFSI는 N 보다 항상 매우 작기 때문에 일반 탐색 기법에 비해 탐색시간이 감소한다. 그림 4는 기존의 인덱스 탐색 기법과 본 논문에서 제안하는 빠른 인덱스 탐색 기법에 대한 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

식 (5)에서 가장 이상적인 송신측 가중치 벡터 \mathbf{w} 는 채널 \mathbf{H} 에 의해 결정되며 이는 식 (6)과 같다^[8].

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{H}^H}{\sqrt{\|\mathbf{H}\|_F^2}} \quad (6)$$

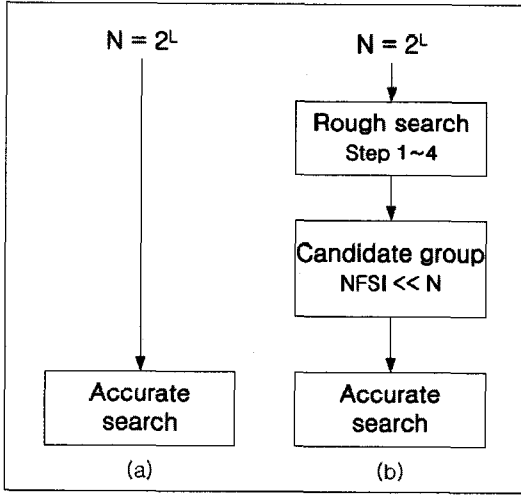


그림 4. (a) 기존 인덱스 탐색 기법에 대한 블록 다이어그램 (b) 빠른 인덱스 탐색 기법에 대한 블록 다이어그램

Fig. 4. (a) Block diagram of normal index search algorithm. (b) Block diagram of fast index search algorithm.

그러나 코드북 크기가 제한되어 있기 때문에 시변하는 채널 \mathbf{H} 에 대해 식 (6)을 만족하는 벡터 인덱스는 존재하지 않는다.

이상적인 \mathbf{w} 와 동일하지는 않지만, \mathbf{w} 와 최대 근접성을 갖는 코드북의 벡터 인덱스를 선택할 수 있으며, 이때 선택된 벡터 인덱스는 다른 벡터 인덱스들보다 시스템 성능이 우수하다.

식 (6)을 정확히 만족하지는 않지만, 채널 \mathbf{H} 와 최대한 근접성을 보이는 벡터 인덱스들을 후보 가중치 벡터라 정의한다. 이들 그룹을 후보자 그룹(candidate group)이라 명명하며, G_k 라 표기한다.

아래의 식 (7), (8)은 후보자 그룹을 선택하기 위한 수식이다. $i = 1, \dots, M_t$ 이며, $\theta(v(i))$ 는 임의의 벡터 \mathbf{v} 의 i 번째 인자의 각도를 의미한다. 이때 임의의 벡터 \mathbf{v} 는 채널 \mathbf{H} 또는 코드북 인덱스 벡터 $\mathbf{w}(k)$ 이다.

$$G_k = \operatorname{argmin} |f(\mathbf{H}e^{-j\angle h_1}) - f(\mathbf{w}(k))| \quad (7)$$

$$f(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^{M_t} |\theta(v(i)) - \theta(v(1))| \quad (8)$$

식 (7), 식 (8)은 채널과 코드북 사이의 각도만을 비교하여 벡터 인덱스를 선택하는 것으로 rough 탐색기법은 이 식을 이용해 이루어진다.

$M_r = 1$ 일 때, $M_r \times M_t$ 크기의 채널 \mathbf{H} 는 복소수로 구성이 되어있으며, 이는 식 (9)와 같다.

$$\mathbf{H} = [h_1 h_2 \dots h_{M_r-1} h_{M_r}] \quad (9)$$

Rough 탐색기법의 첫 번째 단계는 $f(\mathbf{H})$ 를 구하는 것이다.

h_i 에 대한 복소평면 상에서의 각도를 θ_i 라 할 때, 식 (10)을 이용하여 h_1 의 각도를 0° 로 변환, 즉 h_1 을 실수 값으로 만들어 준다. h_1 을 실수 값으로 만들어주는 이유는 각 코드북 벡터 인덱스들의 첫 번째 인자들이 모두 각도가 0° 즉, 실수이기 때문에 채널 인자 역시 이와 동일하게 해주기 위함이다.

\mathbf{H} 의 모든 벡터 값들에 동일하게 $e^{-j\angle h_1}$ 를 곱해주어 h_1 에 대한 각도를 보상한다. 변화된 \mathbf{H} 의 벡터 값들에 대한 각도를 모두 구한 뒤, 식 (11)을 수행한다.

$$\mathbf{H}e^{-j\angle h_1} = [h_1 e^{-j\angle h_1} \dots h_{M_t} e^{-j\angle h_1}] \quad (10)$$

$$f(\mathbf{H}e^{-j\angle h_1}) = 0 + |(\theta_2 - \theta_1)| + \dots + |(\theta_{M_t} - \theta_1)| \quad (11)$$

두 번째 단계는 식 (13)을 통해 $f(\mathbf{w}(k))$ 를 구하는 것이다. 코드북에서 각 벡터 인덱스들의 첫 번째 인자들은 모두 각도가 0° 즉, 실수이다. 그러므로 식 (8)은 식 (12)와 같이 좀 더 간단히 표현된다.

$$f(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^{M_t} |\theta(v(i))|, \quad \theta(v(1)) = 0 \quad (12)$$

식 (13)에서 $\theta_{k,i}$ 에서 $k = 1, \dots, N$ 는 EGT 코드북 벡터 인덱스, $i = 1, \dots, M_t$ 는 송신 안테나 인덱스를 각각 의미한다.

$$f(\mathbf{w}(k)) = \begin{bmatrix} 0 + |\theta_{1,2}| + \dots + |\theta_{1,M_t}| \\ \vdots \\ 0 + |\theta_{N,2}| + \dots + |\theta_{N,M_t}| \end{bmatrix} \quad (13)$$

세 번째 단계는 식 (11), (13)을 이용하여 식 (14)를 수행하여 근접도(proximity)를 구한다.

$$proximity = |f(\mathbf{H}e^{-j\angle h_1}) - f(\mathbf{w}(k))| \quad (14)$$

네 번째 단계는 후보자 그룹을 선택하는 것이다. 식 (15)에 의해 후보 가중치 벡터들을 구한다.

$$G_C = \begin{cases} \operatorname{argmin} |proximity|, & M_t = 2 \\ |proximity| < \theta, & M_t \geq 3 \end{cases} \quad (15)$$

$M_t = 2$ 일 때, 각 코드북 벡터 인덱스에서 첫 번째 송신 안테나를 제외한 송신 안테나에서 1개의 각도만을 가지므로, 식 (15)에서 최소값을 선택해도 정확도는 향상된다.

$M_t \geq 3$ 일 때, 각 코드북 벡터 인덱스들의 첫 번째 송신 안테나를 제외한 나머지 송신 안테나들은 2개 이상의 각도를 가진다. 각도를 갖는 송신 안테나가 증가할수록 코드북 탐색기법의 정확도는 감소하므로 이때는 최소값 대신 식 (15)에서 특정 threshold 각도인 θ' 보다 작은 값을 갖는 다수의 벡터 인덱스들을 선택하여 후보자 그룹을 결정하는 것으로 정확도를 향상시킬 수 있다.

후보자 그룹이 결정되면 후보자 그룹 내의 벡터 인덱스들을 식 (5)를 이용한 accurate 탐색기법을 적용하여 본 논문에서 제안하는 빠른 인덱스 탐색기법을 종료한다.

상기의 알고리즘을 통해 모든 벡터 인덱스 수인 N 보다 후보자 그룹내의 NFSI가 훨씬 작기 때문에 전체 시스템의 계산량이 감소하여 빠른 인덱스 탐색이 가능하다. 근접성을 나타내는 threshold 각도는 시스템 설계자가 정할 수 있으며, 본 논문에서는 이 값을 1 radian 으로 하여, 그 성능을 IV장에 나타낸다.

IV. 시뮬레이션 결과

레이리 페이딩 채널을 기반으로 한 무선 통신 채널의 BPSK 변복조를 이용한 단일 주파수를 통해 데이터를 송·수신하는 컴퓨터 시뮬레이션 환경에서 본 논문에서

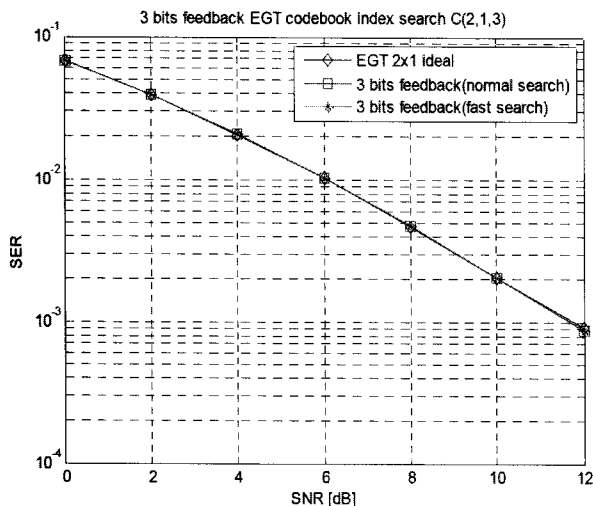


그림 5. 2×1 시스템에서 C(2,1,3) EGT codebook 성능
Fig. 5. 2×1 performance of C(2,1,3) EGT codebook.

새롭게 제안된 빠른 인덱스 탐색 기법에 대한 성능을 측정하였다.

그림 5는 EGT 코드북 C(2,1,3)에서 본 논문에서 제안한 빠른 인덱스 탐색 기법을 적용하였을 때 성능을 나타낸다. $M_t = 2$, $M_r = 1$ 그리고 $L = 3$ 일 때의 성능으로 이상적인 EGT 성능과 기존의 인덱스 탐색기법 그리고 빠른 인덱스 탐색기법의 성능이 모두 일치함을 보인다.

그림 6은 C(3,1,6)에 대한 빠른 인덱스 탐색 기법을 나타낸다. $M_t = 3$, $M_r = 1$ 그리고 $L = 6$ 일 때의 성능으로 이상적인 EGT 성능보다는 약간의 성능저하가

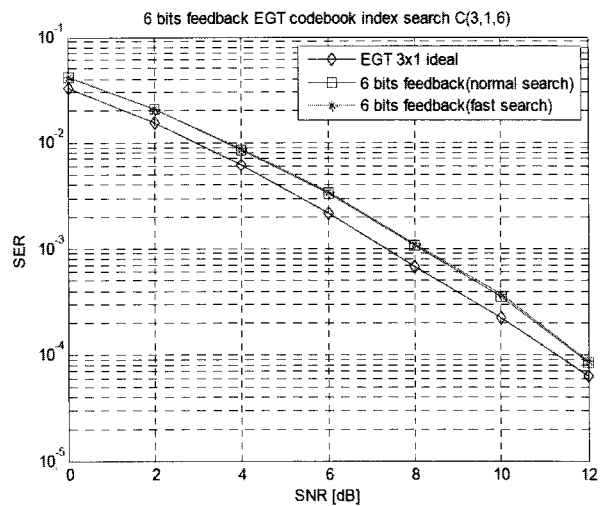


그림 6. 3×1 시스템에서 C(3,1,6) EGT codebook 성능
Fig. 6. 3×1 performance of C(3,1,6) EGT codebook.

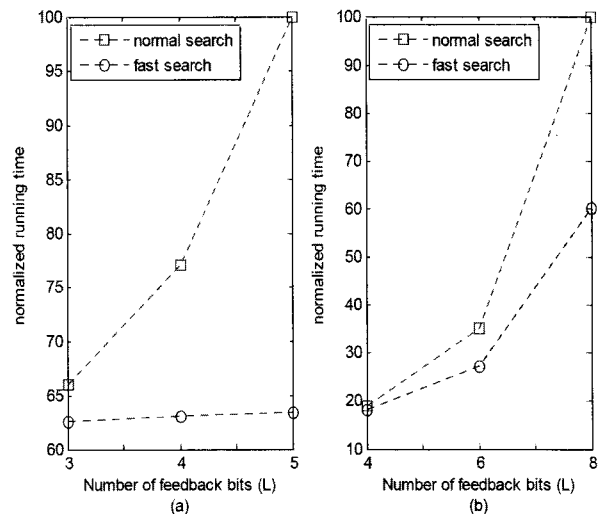


그림 7. (a) C(2,1,3), C(2,1,4) 그리고 C(2,1,5) 실행 시간 비교
(b) C(3,1,4), C(3,1,6) 그리고 C(3,1,8) 실행 시간 비교

Fig. 7. (a) C(2,1,3), C(2,1,4) and C(2,1,5) running time comparison (b) C(3,1,4), C(3,1,6) and C(3,1,8) running time comparison.

표 2. 두 탐색 방법의 평균 벡터 인덱스 수 비교
(샘플 수 : 100,000)

Table 2. A number of average vector index comparison of two search system. (samples : 100,000)

	$N = 2^L$	NFSI	$\frac{N - NFSI}{N} (%)$
$C(2,1,3)$	8	2	75.0
$C(2,1,4)$	16	2	87.5
$C(2,1,5)$	32	2	93.8
$C(3,1,4)$	16	7	56.3
$C(3,1,6)$	64	27	57.8
$C(3,1,8)$	256	105	59.0

발생하지만 기존의 인덱스 탐색기법과 빠른 인덱스 탐색 기법의 성능이 일치함을 보인다.

그림 7은 여러 가지 EGT 코드북에 대해 기존의 벡터 인덱스 탐색기법과 본 논문에서 제안한 빠른 인덱스 탐색기법의 계산량을 비교한 것으로 (a)는 $C(2,1,5)$ 의 실행시간을 100으로 정규화 하고, $C(2,1,3)$, $C(2,1,4)$, $C(2,1,5)$ 의 실행 시간을 나타낸 것이며, (b)는 $C(3,1,8)$ 의 실행 시간을 100으로 정규화 하고, $C(3,1,4)$, $C(3,1,6)$, $C(3,1,8)$ 의 실행시간을 나타낸 것이다. 그림 7에서 코드북 크기가 증가할수록 즉, 코드북 벡터 인덱스 비트의 수인 L 이 증가할수록 EGT 코드북의 탐색시간이 기존의 탐색 시간에 비해 현저히 감소함을 알 수 있다.

표 2는 기존 인덱스 탐색 기법과 본 논문에서 제안하는 빠른 인덱스 탐색 기법에서 각각 탐색된 평균 벡터 인덱스 수를 나타낸다. $(N - NFSI)/N$ 은 코드북 벡터 인덱스 수의 감소정도를 나타낸 것으로 코드북 크기가 증가할수록 감소정도 또한 증가한다. 이때, NFSI는 샘플 수가 100,000개일 때의 평균값을 반올림한 것이다.

$M_t = 2$ 일 경우 rough 탐색기법의 세 번째 단계에서 최소값만을 선택하면 되는데, EGT 코드북은 MRT 코드북과는 달리 진폭을 고려하지 않고 각도를 이용하여 가중치 벡터를 결정하기 때문에 rough 탐색기법의 세 번째 단계에서 2 개의 동일한 절대값을 갖는 인자가 발생하므로 NFSI는 2 이다.

$M_t \geq 3$ 일 경우 빠른 인덱스 탐색 기법에 의한 평균 탐색 인덱스 수가 기존 탐색 기법에 비해 절반 이하로 감소함을 보인다. 그리고 III장에서 설명한 바와 같이 최소값이 아닌 특정 threshold 각도인 θ' 보다 작은 값을 갖는 다수의 벡터 인덱스를 선택하여 후보자 그룹을 결정하기 때문에 이 경우 NFSI는 $M_t = 2$ 인 경우보다

상대적으로 증가한다. 그러나 시스템 설계자가 적절한 threshold 각도 θ' 를 선택한다면 $M_t \geq 3$ 인 경우 NFSI는 표 2의 NFSI 보다 감소할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 코드북을 이용한 EGT 시스템의 코드북 인덱스 탐색 기법에서 실제 채널 상태 정보 및 코드북의 가중치 벡터들에 새롭게 제안하는 간단한 매트릭을 동일하게 적용하여 상호 근접도를 구하여 전체 탐색 시간을 줄이는 알고리즘을 제안하였다. 최소 근접값 또는 특정 threshold 각도 이하의 값을 갖는 특정 벡터 인덱스만을 선택함으로써, 기존의 코드북 탐색 기법보다 탐색 인덱스 수가 줄어들면서 계산량이 감소하여 빠른 탐색을 한다. 성능에서도 이론값과 거의 일치함을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보였다. 또한 본 논문에서 제안된 빠른 인덱스 탐색 기법은 송신 안테나 수 M_t , 수신 안테나 수 M_r , 그리고 벡터 인덱스를 나타내기 위한 필요한 비트의 수인 L 이 변할 경우에도 항상 적용할 수 있다는 장점이 있다.

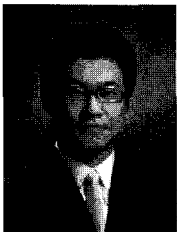
참 고 문 헌

- [1] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh and Rias Muhamed. "Fundamentals of WiMAX understanding broadband wireless networking," Prentice hall, pp. 174-181, 2007.
- [2] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh and Rias Muhamed. "Fundamentals of WiMAX understanding broadband wireless networking," Prentice hall, pp. 296-300, 2007.
- [3] D. J. Love, R. W. Heath, "Limited feedback diversity techniques for correlated channels," IEEE Trans. on Vehic. Tech., vol. 55, no. 2, March, 2006.
- [4] Q. T. Zhang, "Probability of error for equal-gain combiners over Rayleigh channels: Some closed-form solutions," IEEE Trans. Commun., vol. 45, pp. 270-273, Mar. 1997.
- [5] IEEE 802.16-2007, "A simple approach to probability of error for equal gain combiners over Rayleigh channels," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.48, pp. 1151-1154, July 1999.
- [6] D. J. Love, R. W. Heath, "Equal Gain Transmission in Multiple-Input Multiple-Output Wireless Systems," IEEE Trans. Commun., vol. 51, no. 7, July, 2003.

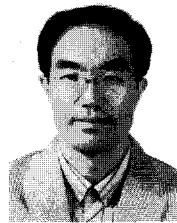
[7] IEEE 802.16-2007, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems," June. 2007.

[8] A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, "Introduction to space time wireless communications," Cambridge university press, pp. 95-96, 2003.

저 자 소 개



박 노 운(학생회원)
 2007년 충북대학교 정보통신 공학과 학사 졸업
 2007년 2월~현재 충북대학교 대학원 정보통신공학과 석사과정
 <주관심분야 : 이동통신 시스템, MIMO, OFDM>



김 영 주(정회원)
 1988년 고려대학교 전자전산 공학과 학사 졸업
 1996년 한국과학기술원 정보통신 공학과 석사 졸업
 2001년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업
 1987년11월~1993년12월 (주)금성사 평택연구소
 1996년 2월~1997년 2월 동경공업대학교 연구원
 2000년 4월~2000년12월 ETRI 위촉연구원
 2001년 1월~2003년 8월 (주)엘지전자 UMTS 시스템연구소
 2003년 9월~현재 충북대학교 전기전자컴퓨터 공학부 교수
 <주관심분야 : 이동통신 시스템, MIMO 유비쿼터스 네트워크>



이 신(학생회원)
 2004년 중국 산둥대학교 정보시스템학과 학사 졸업
 2008년 충북대학교 대학원 바이오 정보기술학과 석사 졸업
 2008년 2월~현재 충북대학교 대학원 정보통신공학과 박사과정

<주관심분야 : 이동통신 시스템, MIMO, OFDM>



이 관 섭(학생회원)
 2007년 충북대학교 정보통신 공학과 학사 졸업
 2007년 2월~현재 충북대학교 대학원 정보통신공학과 석사과정
 <주관심분야 : 이동통신 시스템, MIMO, OFDM>