

논문 2012-49TC-5-2

피드백 에러가 있는 빔포밍 시스템에서 개선된 인덱스 배치기법

(Enhanced Index Assignment for Beamforming with Limited-rate
Imperfect Feedback)

박 노 윤*, 김 영 주**

(Noe Yoon Park and Young Ju Kim)

요 약

양자화된 빔포밍 시스템은 정확한 채널 상태 정보를 특정 벡터로 구성된 유한 집합, 즉 코드북으로 양자화하여 원하는 벡터에 대응되는 인덱스만을 송신단으로 피드백함으로써 피드백 오버헤드 및 지연 등에 의해 발생하는 영향을 최소화한다. 이와 관련하여 전역(exhaustive) 및 그룹화(group-based)를 이용한 탐색 기반의 인덱스 재배치 기법을 통해 추가적인 비트의 요구없이 피드백 에러에 의한 성능저하의 최소화 기법에 대한 연구가 수행되었다. 본 논문에서는 기존에 연구되었던 인덱스 재배치 기법에 코드북 내 벡터간의 chordal 거리에 따른 최적 코드북 설계기법 통해 적응적 특성을 갖는 개선된 그룹화 기반의 코드북 인덱스 배치 기법을 제안한다. Monte-Carlo 기반의 모의실험에 의해 제안하는 기법은 송신 안테나 수가 4이고 LTE 코드북을 이용할 경우 인덱스 재배치 기법을 사용하지 않을 때보다 동일한 비트 에러율을 얻기 위해 0.5~1dB 성능이 향상되며, 기존 그룹화 기반의 인덱스 배치 기법보다는 동일 환경에서 0.1~0.2dB 성능이 향상된다.

Abstract

The quantized beamforming systems always need the channel state information, which must be quantized into a finite set of vectors (named codebook), and feedback only sends the index representing the desired vector. Thereby it minimized the impact of feedback errors, caused by feedback overhead and delay. In this regard, index assignment (IA) methods, an exhaustive-search and group-based schemes, have been presented for minimizes the performance degradation without additional feedback bits. In this paper, we proposed enhanced group-based IA method, which used the optimal codebook design with chordal distance, having the adaptive properties in application of the existing IA methods. When the number of transmit antennas is 4 and LTE codebook is used, Monte-Carlo simulations verify that the proposed scheme has a power advantage of 0.5~1dB to obtain the same bit error rate than methods without IA, and it has 0.1~0.2 dB better performance compared with the existing IA methods over same environment.

Keywords : Beamforming, limited-rate feedback, index assignment, codebook

* 학생회원, 충북대학교 정보통신공학과
(School of Information and Communication
Engineering, Chungbuk National University)

** 평생회원-교신저자, 충북대학교 전자정보대학 컴퓨터정보통신연구소
(Research Institute for Computer and Information
Communication, College of Electrical & Computer
Engineering, Chungbuk National University)

※ 이 논문은 2012학년도 충북대학교 연구년 지원에
의하여 지원되었음.

접수일자: 2012년3월19일, 수정완료일: 2012년5월12일

I. 서 론

MIMO(multiple-input multiple-output) 시스템에서 송신 빔포밍(transmit beamforming) 기법은 복잡한 신호 처리 과정 없이 채널 상태 정보(channel state information, CSI)의 피드백을 통해 송신 신호의 신뢰성을 향상시키는 기술로써 다이버시티 이득(diversity gain) 뿐만 아니라 어레이 이득(array gain)을 제공하는

다^[1]. 그러나 CSI 피드백은 잠재적으로 상당한 오버헤드(overhead) 및 지연(delay)을 발생시킬 뿐만 아니라 대역폭 효율성 저하의 문제점을 갖는다. 이를 해결하기 위해 ‘제한된 피드백 시스템’에 대한 연구가 활발히 수행되었는데^[2-5], 코드북(codebook)을 이용한 빔포밍 시스템은 이에 관한 대표적인 것이다. 피드백 정보량의 감소를 위해 CSI에 대한 양자화 왜곡이 최소화되도록 일정크기의 코드워드로 구성된 코드북을 송수신단에 공유함으로써 원하는 코드워드에 대응되는 인덱스만을 수신단에서 송신단으로 피드백하는 것으로 피드백 오버헤드 및 지연 등에 의해 발생하는 영향을 최소화할 수 있는 장점을 갖는다. 코드북은 Grassmannian line packing 및 DFT 행렬 등을 이용하여 구성이 가능하며^[6-7], 최근 SU-MIMO (single-user MIMO)에 대한 코드북 구성과 함께 MU-MIMO (multi-user MIMO)에 대한 코드북 연구가 활발히 수행되고 있다^[8-12].

한편, ‘제한된 피드백 시스템’에서 피드백 에러의 영향은 부정확한 인덱스 전달을 통한 시스템 성능 저하 및 outage 영역이 증가하는 문제를 가져오기 때문에 이를 해결하기 위한 연구가 수행되고 있다. 대표적인 연구로는 Finite state Markov channel (FSMC) 모델의 특성을 이용한 FSMC 기반 탐색 방법과 평균 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio)의 특성을 이용한 Bayesian 탐색 방법, 그리고 적응형 다이버시티 기법 등이 있다^[13-16]. 한편, 상기의 연구 방법 이외에 매우 간단하면서도 피드백 에러에 강인한 특성을 갖는 것이 인덱스 재배치(index assignment, IA) 기법이다. IA 기법은 종래의 벡터 양자화(vector quantization) 설계에서 발전되었으며^[17-18], 오류 제어 부호화(error control coding)와 같은 다른 피드백 에러 방지 기법들과 비교하여 추가적인 피드백 비트나 신호 처리과정을 요구하지 않는 장점을 갖는다^[19].

코드북 크기에 따라 적용할 수 있는 IA 기법은 전역 탐색(exhaustive search) 및 그룹화를 이용한 IA (group-based IA, GIA) 기법으로 분류 가능하다^[20]. 이때, 크기가 N 인 임의의 코드북에 GIA 기법을 적용하기 위해서는 크기가 M ($M < N$)이며 동일한 송신 안테나 수를 갖는 특정 코드북이 반드시 필요하다. 기존 연구에서는 이를 위해 WiMAX 등의 표준화 문서에 정의된 코드북^[21] 또는 Grassmannian beamforming 기반의 생성을 통한 코드북^[6] 등을 이용하였는데, 송신 안테나 수 및 코드북 크기 M 에 따라 선택 가능한 코드북은 제한

적이었다.

본 논문에서는 코드북 선택의 범위를 확장시키기 위해 코드북 내 행렬간의 chordal 거리에 따른 최적 코드북 설계기법을 이용, 원하는 크기의 코드북을 생성하여 GIA 기법에 적용한 개선된 그룹화 기반의 코드북 인덱스 배치 기법을 제안하고 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 코드북을 이용한 기본적인 피드백 시스템 및 전역 탐색과 그룹화를 이용한 IA 기법에 대해 설명하고, III장에서는 제안하는 기법을 통한 피드백 에러 강화 기법 및 장점을 설명한다. IV장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 다양한 코드북에서 제안하는 GIA 기법의 성능을 비교 및 분석하며, 마지막으로 VI장에서 본 논문의 결론을 서술한다.

본 논문에서는 다음과 같은 표기법을 사용한다. u (m, n)는 직교 열(orthogonal columns)로 구성된 $m \times n$ 크기의 행렬 집합, \mathbf{I}_M 는 $M \times M$ 크기의 항등 행렬(identity matrix), 굵은 정자체 대문자 \mathbf{A} 는 행렬, 굵은 정자체 소문자 \mathbf{a} 는 벡터, $a_{i,j}$ 는 \mathbf{A} 행렬 내 i 번째 행, j 번째 열의 원소, \mathbf{A}^H 는 \mathbf{A} 행렬의 공액 전치(conjugate transposition), $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ 는 m 개의 행과 n 개의 열을 갖는 복소 행렬, 그리고 $\|\cdot\|_F$ 는 Frobenius norm 을 의미한다.

II. 시스템 모델

1. 피드백 시스템

수신 안테나 수가 N_R , 송신 안테나 수가 N_T 인 MIMO 기반의 간단한 피드백 시스템을 그림 1에 보인다. 비트 스트림 수가 $R \leq \min(N_T, N_R)$ 일 때, 송신 신호 $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{R \times 1}$ 는 정규화(normalized)된 선부호화 행렬 $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N_T \times R}$ 와 곱해진 후 송신되는데, i.i.d. (independent and identically distributed) 특성을 갖는 페이딩 채널 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$ 에 대해 수신된 기저대역 신호 \mathbf{y} 는 다음과 같다.

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

이 때, $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ 는 AWGN (additive white gaussian noise) 벡터 성분이다. 송신 빔포밍을 위한 피드백 정보의 양은 채널의 탭 수, 송신 안테나의 개수 및 사용자 수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하여 전체

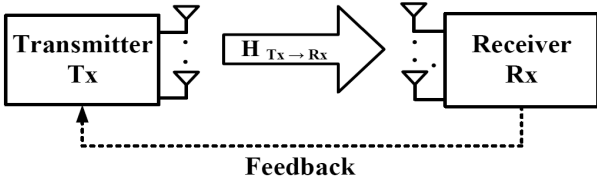


그림 1. 빔포밍 기법을 위한 피드백 방식의 블록도
Fig. 1. Block diagram for beamforming using feedback.

시스템에 오버헤드로 작용한다. 이를 해결하기 위해 성능 열화가 발생하지 않는 범위 내에서 피드백 정보를 최소로 압축하여 전송하기 위해 양자화된 선부호화 행렬들의 집합인 코드북을 이용한다. 코드북 W 는 $W = \{\mathbf{W}_k\}_{k=1}^N$, $\mathbf{W}_k \in \mathcal{U}(N_T, R)$ 으로 표기하며, 이 때 N 은 코드북 내 전체 인덱스 수를 의미한다.

전체 시스템 성능을 최대화하기 위해 수신단에서 추정된 채널 정보 \mathbf{H} 를 이용하여 피드백되는 최적 코드북 내 k_{opt} ($1 \leq k \leq N$) 번째 인덱스는 최적 코드북 인덱스 선택 기법을 이용해 결정된다. 대표적인 최적 코드북 인덱스 선택 기법은 SNR (signal-to-noise ratio) 또는 채널 용량 (channel capacity)을 이용한다. 먼저 수신 SNR을 이용한 선택 기법은 식 (2)에 의해 결정된다^[7]. 이 때, k 는 정수이다.

$$k_{opt} = \underset{\mathbf{H} \in \Omega, k \in \{1, \dots, N\}}{\operatorname{argmax}} \quad \|\mathbf{H}\mathbf{W}_k\|_F \quad (2)$$

채널 용량을 이용한 선택 기법은 식 (3)에 의해 결정된다^[22]. 이 때, ρ 는 추정된 SNR 이다.

$$k_{opt} = \underset{\mathbf{H} \in \Omega, k \in \{1, \dots, N\}}{\operatorname{argmax}} \quad \log_2 \det \left(\mathbf{I}_M + \frac{\rho}{R} \mathbf{W}_k^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{W}_k \right) \quad (3)$$

2. 전역 탐색을 통한 인덱스 재배치 기법

코드북을 구성하는 인덱스의 크기가 3 비트 이하일 경우 전역 탐색 기법을 통한 IA 기법이 적용된다. 그림 2는 수신단에서 송신단으로의 피드백 수행 시 코드북 인덱스의 1비트 에러가 발생 했을 경우 코드북의 인덱스 변화를 나타낸 순서도이다. 실제 시스템에서는 2비트 이상의 에러가 발생할 확률이 매우 작기 때문에 본 논문에서는 1 심벌에 대해 최대 1비트를 초과하는 에러가 생기지 않을 것이라고 가정한다. 이 순서도를 기반으로 L 비트의 인덱스로 구성된 코드북에 대해 다음의 순서

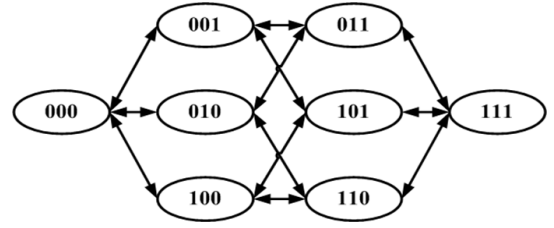


그림 2. 1비트 에러 순서도 (3비트 피드백)
Fig. 2. 1bit error flow chart (3bit feedback).

를 통해 전역 탐색을 통한 IA 기법이 적용된다.

가) 인덱스들의 배치 순서를 고려하여 생성 가능한 코드북에 대해 모든 경우의 수를 생성한다. 이 때 생성될 수 있는 코드북 수는 2^L 이다.

나) 식 (4)를 통해 가)에서 생성된 각 코드북 내 인덱스를 구성하는 비트들의 해밍 거리 (hamming distance)에 따른 비용함수 C^l , $l = 1, \dots, 2^L$ 를 각각 계산한다.

$$C^l = \sum_{i=0}^{2^l-2} \sum_{j>i}^{2^l-1} I(d_{I_i, I_j}) \left| (\mathbf{W}_i^l)^H (\mathbf{W}_j^l) \right|^2 \quad (4)$$

이 때, $\mathbf{W}_i^l, \mathbf{W}_j^l$ 는 l 번째 코드북 내 i 및 j 번째 인덱스에 대응되는 코드워드이다. l 번째 코드북 내 i 번째 인덱스 I_i 와 j 번째 인덱스 I_j 와의 해밍 거리 d_{I_i, I_j} 에 따른 $I(d_{I_i, I_j})$ 는 식 (5)에 의해 결정된다. 즉, 두 인덱스 간의 해밍 거리가 1인 경우 식 (4)에서 $I(d_{I_i, I_j})$ 는 1이며, 그 이외의 경우 $I(d_{I_i, I_j})$ 는 0으로 정의한다.

$$\begin{cases} \text{hamming distance} = 1, & I(d_{I_i, I_j}) = 1 \\ \text{otherwise,} & I(d_{I_i, I_j}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

다) 식 (4)를 통해 가장 큰 비용함수를 갖는 l 번째 코드북이 전역 탐색을 통한 최적의 IA 기법이 적용된 코드북으로 결정된다.

L 비트의 인덱스로 구성된 코드북에 대해 전역 탐색 기반 인덱스 재배치 기법을 적용하기 위해서는 2^L 개의 코드북이 필요하다. 만약 코드북 크기가 16 이상인 경우에는 $2^4 > 10^{13}$ 개의 코드북을 생성해야 하기 때문에 이는 시스템적으로 불가능하다. 이를 위해 준최적 기법중의 한 가지인 GIA 기법이 고려된다.

3. 그룹화 기반의 인덱스 재배치 기법

GIA 기법은 크기가 N 인 자녀 코드북(child codebook) $C_{ch} = [\mathbf{W}_0, \mathbf{W}_1, \dots, \mathbf{W}_{N-1}]$ 과 크기가 M ($M < N$)인

전역 탐색을 통해 IA 기법이 적용된 부모 코드북(parent codebook) $C_p = [C_0, C_1, \dots, C_{M-1}]$ 을 이용해 아래와 같이 구성된다.

가) M 개의 빈 그룹(empty group)을 생성한다.

나) $m = 0$ 이라 지정한다.

다) $l = [m]_M$ 을 수행한다. 이 때, $[\cdot]_M$ 는 modulo- M 연산이다.

라) 부모 코드북 내 l 번째 빔포밍 행렬 C_l 에 대해 모든 자녀 코드북 내 선부호화 행렬과의 내적(inner product)을 각각 구한 후, 가장 큰 내적을 갖는 자녀 코드북 내 빔포밍 행렬을 l 번째 그룹에 포함시킨다.

마) 라)에서 선택된 자녀 코드북 내 빔포밍 행렬을 제외한 나머지 빔포밍 벡터들을 새로운 자녀 코드북으로 지정한다.

바) $m = m + 1$ 이라 지정한다. $m < N$ 을 만족할 때까지 다)~마) 과정을 반복 수행한다.

사) M 개의 각 그룹에는 N/M 개의 자녀 코드북 내 선부호화 행렬들이 배치된다. 그룹 순서에 따라 인덱스를 차례대로 매핑한다. 이때, 각 그룹 내 선부호화 행렬의 배치 순서는 전체 성능에 미치는 영향이 매우 작기 때문에 임의로 결정한다. 이를 통해 최적의 IA 기법이 적용된 코드북이 결정된다.

GIA 기법을 적용하기 위해서 부모 코드북 지정은 반드시 필요한데, 기존 연구에서는 WiMAX 등의 표준화 문서에 정의된 코드북^[21] 또는 Grassmannian beamforming 기반의 생성을 통한 코드북^[6] 등을 이용하였지만, 송신 안테나 수 및 코드북 크기 M 에 따라 선택 가능한 코드북은 제한적이었다. 최근의 표준화 문서에 정의된 코드북은 송신 안테나 수가 2, 4 그리고 8 로만 지정되었으며, 그 크기 또한 특정 송신 안테나 수에 따라 8, 16, 32 등으로 제한적이다. 만약, 표준화 문서에 명기되어 있지 않은 코드북이 필요할 경우에는 Grassmannian beamforming 기반의 생성을 통한 코드북 등을 이용해야만 한다. 따라서 부모 코드북을 결정할 수 있는 요건은 제한적이다.

III. 개선된 그룹화 기반의 인덱스 재배치 기법

제안하는 개선된 그룹화 기반의 인덱스 재배치 기법(enhanced GIA, EGIA)은 부모 코드북을 자녀 코드북 내에서 결정함으로써 송신 안테나 수 및 크기 M 에 따

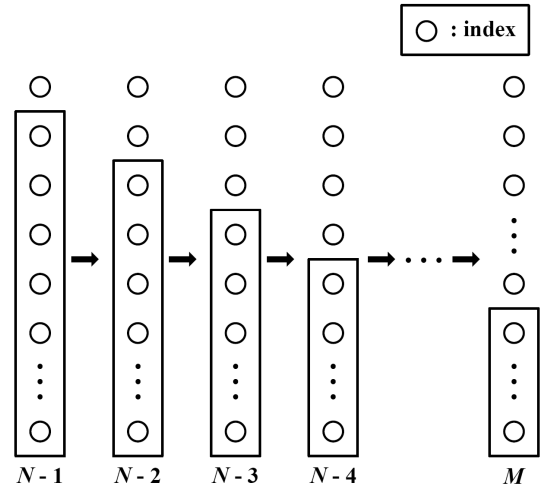


그림 3. 참조 코드북 생성 방법

Fig. 3. Generation method for reference codebook.

른 제약없이 간단하게 구성할 수 있다. 제안하는 EGIA 기법에서는 부모 코드북 대신 참조 코드북(reference codebook)을 새롭게 정의한다. 그림 3은 참조 코드북의 생성 원리를 간단히 도식화한 것으로 크기가 N 인 자녀 코드북에서 크기가 M 인 참조 코드북이 될 때까지 한 개의 인덱스에 대응되는 선부호화 행렬을 계속 제거하면서 전체 성능에 영향을 최소화하는 선부호화 행렬들을 선택하는 것을 나타낸다. 이에 대한 상세한 과정은 다음과 같다.

가) 자녀 코드북에서 하나의 빔포밍 행렬을 삭제함으로써 $N-1$ 의 크기를 갖는 후보 코드북 F'_p , $p (1 \leq p \leq N)$ 을 생성한다. 이 때, p 는 정수이며, 생성될 수 있는 전체 후보 코드북 수는 N 이다.

나) N 개의 후보 코드북들 중에서 최적의 코드북을 선택하기 위해 Grassmannian subspace packing 관련 연구에서 코드북의 성능과 밀접하게 연관되는 chordal 거리를 이용한다^[21-22]. Grassmannian manifold에 속한 부분공간의 상대 거리를 의미하는 chordal 거리는 식 (6)을 통해 계산된다. 이 때, k, l 은 $k \neq l, 1 \leq k, l \leq N-1$ 을 만족하는 정수이다.

$$d(\mathbf{W}_k, \mathbf{W}_l) = \sqrt{1 - |\mathbf{W}_k^H \mathbf{W}_l|^2} \quad (6)$$

최소 chordal 거리 δ_{\min} 가 식 (7)을 통해 정의될 때, Grassmannian subspace packing 기법에서 최적의 코드북은 최소 chordal 거리를 최대화하도록 설계된다^[21]. 그림 4는 크기가 6인 임의의 코드북 내 인덱스에 대응되는 코드워드들을 2차원 Grassmannian manifold 내에

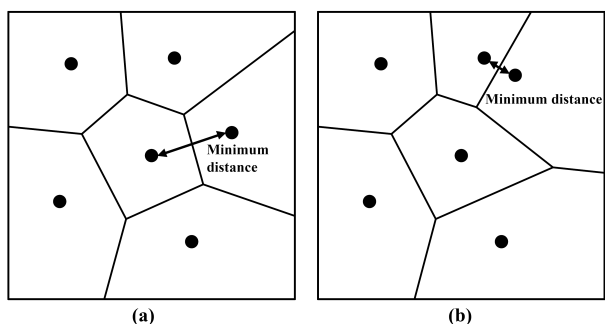


그림 4. 특정 코드워드 간의 최소 chordal 거리에 따른 2차원 Grassmannian manifold 내 Voronoi 다이어그램 비교 ($N=6$)

Fig. 4. Comparison of the Voronoi diagram in 2-dimensional Grassmannian manifold by minimum chordal distance between specific codewords ($N=6$).

위치시킬 때 최소 chordal 거리에 따라 Voronoi 다이어그램^[25~26]을 적용한 것으로, 최소 chordal 거리에 따라 설계된 코드북의 공간 표현을 비교한 것이다. 그림 4-(a)에 나타난 Voronoi 다이어그램은 코드워드들이 다양한 채널에 성공적으로 동작하기 위해서 2차원 Grassmannian manifold 내 모든 부분공간에 균등하게 분포하지만, 그림 4-(a)보다 작은 최소 chordal 거리를 갖는 그림 4-(b)에서는 균등하지 못한 공간 분포를 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 가)에서 생성된 N 개의 후보 코드북 중에서 CSI에 대한 양자화 왜곡이 최소화될 수 있는 최적의 코드북은 식 (8)에 의해 각각의 후보 코드북의 최소 chordal 거리 δ_{\min}^p 중에서 가장 큰 δ_{\min} 를 갖는 p_{opt} 번째 후보 코드북을 최적 후보 코드북으로 결정한다.

$$\delta_{\min} = \min_{k \neq l, 1 \leq k, l \leq N} d(\mathbf{W}_k, \mathbf{W}_l) \quad (7)$$

$$p_{opt} = \operatorname{argmax}_{p \in \{1, 2, \dots, N\}} \delta_{\min}^p \quad (8)$$

다) 나)에서 선택된 최적 후보 코드북의 크기가 N_{ref} 일 때, $N_{ref} \neq M$ 인 경우 선택된 최적 후보 코드북을 크기가 $N = N_{ref}$ 인 새로운 자녀 코드북으로 지정한다.

라) $N_{ref} = M$ 이 될 때까지 가)~나)과정을 반복한다.

마) $N_{ref} = M$ 일 때 식 (8)에서 최종적으로 선택된 코드북을 참조 코드북으로 정의한다.

바) 결정된 참조 코드북에 대해 이전 장에서 기술한

전역 탐색 기반의 IA 기법을 적용한다. 이후 과정은 기존의 GIA 기법과 동일하며, 부모 코드북 대신 참조 코드북을 이용한다.

제안하는 EGIA 기법은 참조 코드북의 생성에 있어 기존의 부모 코드북 선택기법보다 확장된 적응적 특성을 갖는다. 즉, 자녀 코드북으로부터 원하는 크기의 참조 코드북을 생성할 수 있기 때문에 기존 연구에서 제한되었던 부모 코드북의 크기나 선택적 제약 등에서 벗어날 수 있는 장점을 갖는다.

IV. 시뮬레이션

제안하는 EGIA 기법의 성능을 정확히 측정하기 위해 Monte-Carlo 기반의 모의실험을 통해 피드백 에러를 갖는 시스템 환경에서 비트 에러율(bit error rate, BER)을 측정 및 분석하였다. 표 1은 모의 실험을 위한 여러 가지 가정 및 파라미터를 정리한 것이다. LTE 기반의 시스템 모델에서 무선 채널 모델은 $CN(0,1)$ 분포로써 준정적 플랫폼 페이딩을 가지며, 심벌 전송에 있어 채널 특성이 일정하다고 가정한다. 즉, 무선 채널 모델에서의 페이딩 현상은 각 심벌마다 독립적으로 발생한다. 다중 경로 채널을 위한 PDP (power delay profile)은 ITU-R 모델의 Pedestrian

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters.

Parameters	Values
Modulation/Demodulation	QPSK
Bandwidth [MHz]	5
Sampling rate [MHz]	7.68
IDFT/DFT size	512
Number of occupied subcarriers	300
Number of slots	2
Cyclic prefix mode	Normal
Number of bit streams	1
Number of transmitter antennas	4
Number of receiver antennas	2
Channel model	Rayleigh fading
Multi-path model	ITU-R (Pedestrian A)
Number of multi-paths	3
Relative delay [ns]	[0 110 190]
Average power [dB]	[0 -9.7 -19.2]
Codebook :	
	- 4 bits 3GPP LTE 4Tx rank 1 codebook,
	- 3 bits WiMAX codebook V(4,1,3)

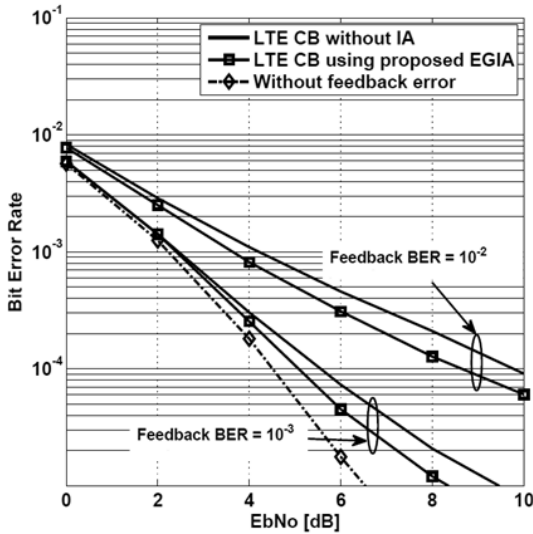


그림 5. 제안하는 인덱스 재배치 기법 사용 유무에 따른 BER 성능 비교
 Fig. 5. Comparison of BER performance with or without the proposed index assignment.

A 를 이용하였으며^[27], LTE, WiMAX 표준화 문서에 명기된 코드북을 이용한다^[21, 28]. 채널 추정 (channel estimation) 및 동기화 (synchronization) 그리고 안테나 사이의 상관관계 (antenna correlations) 는 모두 이상적이라고 가정하며, 잡음은 $CM(0, N_0)$ 의 분포를 가지는 가산성 백색 가우시안 잡음을 이용한다.

그림 5는 송신 안테나 수가 4, 수신 안테나 수가 2인 MIMO-OFDM 시스템에 4 비트 3GPP LTE 4Tx rank 1 코드북(이하 4 비트 LTE 코드북)을 적용하였을 때 제안하는 EGIA 기법의 성능을 나타낸다. 피드백 에러 발생확률(Feedback BER)이 10^{-2} 인 경우 BER이 10^{-3} 에서 LTE 코드북에 제안하는 EGIA 기법('LTE CB using proposed GIA' 표기)을 적용하는 것은 IA 기법을 적용하지 않았을 때('LTE CB without IA' 표기)보다 0.5 dB 이득을 얻는다. 또한, 피드백 에러 발생확률이 10^{-3} 인 경우 BER이 10^{-4} 에서는 0.5 dB 이득을 얻는다.

즉, 피드백 에러가 발생할 때 제안하는 EGIA 기법을 적용하면 상당한 이득을 얻을 수 있다.

그림 6은 기존의 연구에서 제안되었던 GIA 기법('Conventional GIA' 표기)과 본 논문에서 제안하는 EGIA 기법('Proposed GIA' 표기)의 성능을 비교한 것이다. 기존의 GIA 기법을 적용하기 위해서는 부모 코드북을 정의해야 하는데, LTE 코드북의 경우 송신 안테나 수가 4인 경우 3 비트로 구성된 코드북이 없기 때문에 WiMAX 표준화 문서 내 표 298o에 기술되어 있는 3 비트 WiMAX

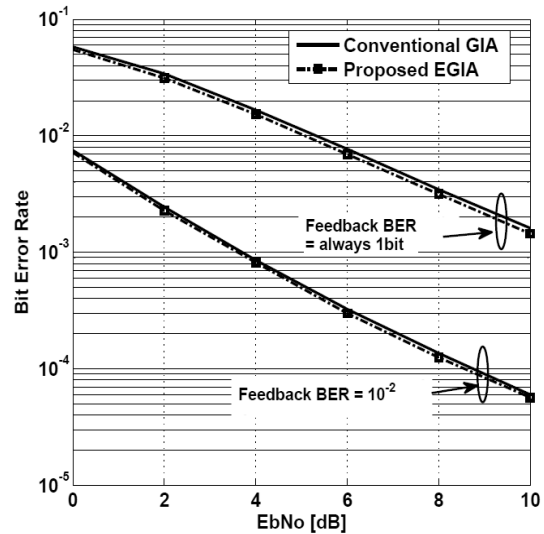


그림 6. 기존 GIA 기법과 제안하는 EGIA 기법의 BER 성능 비교
 Fig. 6. Comparison of BER performance between the conventional and the proposed schemes.

코드북 V(4,1,3)을 부모 코드북으로 정의하였다. 항상 1 비트의 피드백 에러가 발생하거나 10^{-2} 의 피드백 에러 발생확률에 대해 제안하는 EGIA 기법은 기존의 GIA 기법보다 0.1~0.2 dB 의 이득을 얻는다. 이를 통해 송신 안테나 수 및 코드북 크기에 따라 선택 가능한 부모 코드북이 제한되었던 기존 GIA 기법에 비해 자녀 코드북 내에서 참조 코드북을 결정할 수 있는 제안하는 EGIA 기법보다 개선된 성능 이득을 제공할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 코드북 내 빔포밍 행렬간의 chordal 거리를 이용한 상대거리를 측정하여 적응적 특성을 갖는 개선된 그룹화 기반의 코드북 인덱스 배치 기법을 제안하였다. 기존의 연구에서는 부모 및 자녀 코드북을 이용하여 인덱스 배치 기법을 적용하였지만, 송신 안테나 수 및 코드북 크기 등에 포함해 부모 코드북을 결정할 수 있는 요건은 제한적이었다. 제안하는 기법은 자녀 코드북 으로부터 원하는 크기의 부모 코드북을 생성하는 것으로 부모 코드북의 크기나 선택적 제약 등에서 벗어날 수 있는 장점을 갖는 것과 동시에 모의실험 결과 개선된 성능 이득을 보인다.

참고 문헌

- [1] T. K. Y. Lo, "Maximum ratio transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, pp. 1458-1461, Oct. 1999.
- [2] D. J. Love, R. W. Heath, Jr., W. Santipach and M. L. Honig, "What is the value of limited feedback for MIMO channels," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, No. 10, pp. 54-59, Oct. 2004.
- [3] K. K. Mukkavilli, A. Sabharwal, B. Aazhang and E. Erkip, "On beamforming with finite rate feedback in multiple antenna systems," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2562-2579, Oct. 2003.
- [4] P. Xia and G. B. Giannakis, "Design and analysis of transmit-beamforming based on limited-rate feedback," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 54, no. 5, pp. 1853-1863, May 2006.
- [5] S. G. Kim, Xun Li and Y. J. Kim, "Performance analysis of precoded LTE-Advanced uplink system," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 48, no. 5, pp. 418-425, May 2011.
- [6] D. J. Love, R. W. Heath, Jr., "Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2735-2747, Oct. 2003.
- [7] D. J. Love and R. W. Heath, Jr., "Equal gain transmission in multiple-input multiple-output wireless systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 7, pp. 1102 - 1110, Nov. 2002.
- [8] IEEE 802.16m, "Multi-user MIMO proposal for 16m," C802.I 6m-08/1185rI, 2008.
- [9] Samsung, RI-051353, "Downlink MIMO for EUTRA," 3GPP TSG RAN WGI Meeting #43, Seoul, Korea, Nov. 2005.
- [10] Philips, RI-062483, "Comparison between MU-MIMO codebook-based channel reporting techniques for LTE downlink," 3GPP TSG RAN WGI Meeting #46bis, Seoul, Korea, Oct. 2006.
- [11] Freescale Semiconductor Inc., RI-071511 "Results on Zero-forcing MU-MIMO," 3GPP TSG RAN WGI Meeting #48bis, St. Julian's, Malta, Feb. 2007.
- [12] Qing Gu, N. Y. Park, Xun Li and Y. J. Kim, "Performance analysis of MU-MIMO employing differential precoding," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 48, no. 10, pp. 711-716, Oct. 2011.
- [13] H. S. Wang and N. Moayeri, "Finite-state Markov channel - A useful model for radio communication channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 163-171, Feb. 1995.
- [14] A. E. Ekpenyong and Y.-F. Huang, "Feedback-detection strategies for adaptive modulation systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 54, no. 10, pp. 1735-1740, Oct. 2006.
- [15] A. E. Ekpenyong and Y.-F. Huang, "Feedback constraints for adaptive transmission," *IEEE Signal Process. Mag.*, pp.69-78, May 2007.
- [16] S. Y. Choi, H. C. Yang, M. S. Alouini and K. A. Qaraqe, "Joint adaptive modulation and diversity combining with feedback error compensation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 11, pp. 3214-3219, Nov. 2009.
- [17] K. Zeger and A. Gersho, "Pseudo-Gray coding," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, no. 12, pp. 2147-2158, Dec. 1990.
- [18] G. Ben-David, D. Malsh, "Bound on the performance of vector-quantizers under channel errors," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 51, no. 6, pp. 2227-2235, Jun. 2005.
- [19] P. Zhu, L. Tang, Y. Wang, and X. You, "Index assignment for quantized beamforming MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 8, pp. 2917-2922, Aug. 2008.
- [20] T. Xu, H. Liu, "Index assignment for beamforming with limited-rate imperfect feedback," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 865-867, Nov. 2007.
- [21] IEEE Std 802.16e-2005. "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 16, Amendment 2 and Corrigendum 1," New York, NY : IEEE, Feb. 2006.
- [22] T. J. Kim, D. J. Love and B. Clerckx, "MIMO system with limited rate differential feedback in slowly varying channels," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 59, no. 4, pp. 1175-1189, Apr. 2011.
- [23] D. J. Love, and R. W. Heath, Jr, "Limited feedback unitary precoding for orthogonal space-time block codes," *IEEE Trans. Signal. Proc.*, vol. 53, no. 1, pp. 64-73, Jan. 2005.
- [24] A. Barg and D. Y. Nogin, "Bounds on packings of spheres in the Grassmann manifold," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 48, no. 9, pp. 2450 - 2454, Sep. 2002.
- [25] F. Aurenhammer, Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure, *ACM Comput. Surv.*, vol. 23, no. 3, pp. 345-405, Sep. 1991.

- [26] A. Okabe, B. Boots, K. Sugihara, and S. N. Chiu., Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams, 2nd edition, John Wiley, Chichester, UK, 2000.
- [27] Recommendation ITU-R M.1225, Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, 1997.
- [28] 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 36.211 - Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 8), Dec. 2008.

 저 자 소 개



박 노 윤(학생회원)
 2007년 충북대학교 정보통신공학과
 학사 졸업.
 2009년 충북대학교 정보통신공학과
 석사 졸업.
 2009년~현재 충북대학교
 정보통신공학과 박사 과정.

<주관심분야: 차세대이동통신시스템, LTE-A, MIMO>



김 영 주(평생회원)-교신저자
 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 위축연구원
 2001년 1월~2003년 8월 (주)엘지전자 UMTS
 시스템연구소

2003년 9월~현재 충북대학교 전자정보대학 교수
 <주관심분야 : LTE-A, Distributed antenna
 system>