

주파수 분할 하향링크 거대 다중 안테나 시스템을 위한 코드북 형성 및 검색 기법

최 일 규*, 노 훈 동*, 이 충 용^o

A Codebook Generation and Search Scheme for FDD Downlink Massive MIMO Systems

Il-gyu Choi*, Hoon-dong Nho*, Chung-yong Lee^o

요 약

주파수 분할 하향링크 다중 안테나 시스템에서 사용되는 코드북 기반의 채널 정보 피드백 기법을 거대 다중 안테나 시스템에 그대로 적용할 경우 다음의 두 가지 문제가 생기게 된다. 먼저, 코드북 형성에 필요한 자원이 안테나 수에 지수적으로 필요하기 때문에 안테나 수가 매우 많은 거대 다중 안테나 시스템에서는 코드북 형성이 어려워진다. 뿐만 아니라, 사용자의 코드북 검색 시간이 안테나 수에 비례하기 때문에 채널 정보를 피드백 하는데 긴 시간이 필요하게 된다. 본 논문에서는 DFT 코드북의 계수를 안테나 별로 찾음으로써 코드북 형성에 필요한 자원을 안테나 수에 선형적으로 만드는 코드북 형성 기법을 제안한다. 그리고 일정 조건 하에 코드북 검색을 도중에 멈춤으로써 검색 시간을 감소시키는 기법을 제안한다. 실험 결과들은 제안 기법들이 기존 기법에 가까운 성능을 갖고 있음에도 코드북 형성 및 검색에 필요한 자원을 대폭 감소시킬 수 있음을 보여준다.

Key Words : codebook, massive MIMO, FDD, downlink, feedback

ABSTRACT

Applying channel state information feedback scheme based on codebook for FDD downlink MIMO system to massive MIMO system directly causes following two problems. First, codebook generation becomes hard because resources needed for codebook generation increases exponentially in the number of antennas. In addition, long time is needed for channel state information feedback because users's codebook search time increases linearly in the number of antennas. This paper proposes a codebook generation scheme and a codebook search scheme which can reduce resource for codebook generation and codebook search time drastically though they have similar performance as conventional approaches.

I. 서 론

다중 안테나 기법은 4세대 무선 통신 시스템에서 채택되어 단일 안테나를 사용하는 3세대 무선 통신

시스템보다 높은 주파수 효율을 이루어 냈다. 다중 안테나 기법은 송수신 안테나 중 적은 안테나 수만큼 채널 용량을 증가시킬 수 있고, 송수신 안테나 수의 곱만큼 신뢰도를 증가시킬 수 있다^[1]. 그러나 빠른 페이

* 주저자 : 연세대학교 전기전자공학과 통신신호처리 연구실, gentlealgu@csp.yonsei.ac.kr, 학생회원

^o 교신저자 : 연세대학교 전기전자공학과 정교수, cylee@yonsei.ac.kr, 종신회원

* 연세대학교 전기전자공학과 통신신호처리 연구실, nhd@csp.yonsei.ac.kr

논문번호 : KICS2013-07-283, 접수일자 : 2013년 7월 4일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 8일

딩, 사용자 간 간섭 등의 요인에 의하여 성능이 제한되며, 이를 해결하기 위해서는 DPC (dirty paper coding), vector perturbation, ML (maximum likelihood) 수신기처럼 높은 복잡도를 갖는 비선형 송수신기가 필요하다^{2,3)}.

거대 다중 안테나 시스템은 송수신단에 수많은 안테나를 설치함으로써 간단한 선형 송수신기로도 위의 문제들을 해결할 수 있어 차세대 무선 통신 시스템의 기술로 주목받고 있다⁴⁻⁷⁾. 기지국에 무수히 많은 안테나를 사용할 경우 대수의 법칙에 의하여 정합 필터 (matched filter) 빔형성 (beamforming) 기법만으로도 위의 문제들을 완벽히 해결할 수 있다^{4,5)}. 하지만 거대 다중 안테나 시스템의 이러한 장점은 송수신단에서 완벽한 채널 정보를 알고 있을 때 가능하기 때문에 채널 추정 비용이 안테나 수에 영향을 받지 않는 시간 분할 (time division duplex, TDD) 시스템 기반의 연구들이 주로 진행되어왔다^{4-6,8)}.

현재 UMTS, WCDMA, CDMA2000 등 대수의 통신시스템은 주파수 분할 (frequency division duplex, FDD) 모드를 지원하고 있으므로, 기존 시스템과의 하위 호환성 (backward compatibility) 을 고려한다면 주파수 분할 시스템에서 거대 다중 안테나 시스템을 지원할 방안을 모색할 필요가 있다. 기존 주파수 분할 하향링크 다중 안테나 시스템에서는 코드북을 기반으로 채널 정보를 송신단에 피드백 하는 것이 일반적이다. 채널의 방향을 양자화 (quantization) 한 코드북을 송수신단이 공유함으로써, 코드북 벡터의 인덱스 (index) 만을 송신단에 피드백하는 것만으로 무한한 범위를 갖는 채널 정보를 효율적으로 피드백할 수 있다. 코드북은 수신단 안테나가 하나이고 채널이 Rayleigh 분포를 따를 때, 최대 유사도 (correlation) 을 최소화시키는 Grassmannian 기준으로 형성된 것이 최적이라 알려져 있으며, DFT (discrete Fourier transform) 코드북, RVQ (random vector quantization) 코드북 등이 주로 연구되어 왔다⁹⁻¹¹⁾.

이러한 코드북 기법은 기존 다중 안테나 시스템을 대상으로 연구되어왔기에, 수십 혹은 수백의 안테나를 갖고 있는 거대 다중 안테나 시스템에 적용할 경우 크게 두 가지의 문제가 발생할 수 있다. 첫 번째는 코드북 형성이 어려워진다는 것이다. 코드북 형성에 필요한 연산량 및 시간은 안테나 수에 지수적으로 증가하기 때문에, 거대 다중 안테나 시스템에서는 그 양이 무한에 가까워진다. 코드북 형성이 오프라인 과정이라 할지라도, 무한에 가까운 신호 처리를 수행하는 것은 불가능하다. 본 논문에서는, 기존의 코드북 형성 기법

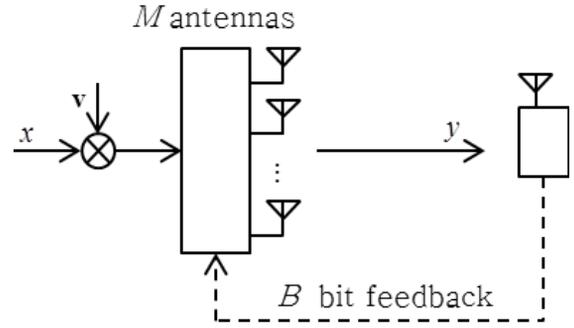


그림 1. 주파수 분할 하향링크 다중안테나 시스템
Fig. 1. FDD downlink MIMO system

을 거대 다중 안테나 시스템에 적합하게 개선한 기법들을 소개한다. 두 번째는 코드북을 검색하는데 걸리는 시간이 증가한다는 것이다. 코드북 형성과 달리, 코드북 검색은 온라인 과정으로, 그 시간이 길 경우 실시간 통신에 큰 부담이 된다. 코드북 검색에 필요한 시간 역시 안테나 수에 비례하게 되므로, 거대 다중 안테나 시스템에서는 낮은 복잡도와 검색 시간을 갖는 새로운 코드북 검색 기법이 필요하다. 본 논문은 일정 조건 하에 코드북 검색을 멈춤으로써 검색 시간을 대폭 감소시킨 기법을 제안하였다.

II. 주파수 분할 하향링크 다중 안테나 시스템

그림 1은 주파수 분할 하향링크 다중안테나 시스템을 나타낸다. 본 논문은 피드백의 영향에만 집중하기 위해 다중 스트림 간섭, 다중 사용자 간섭, 다중 셀 간섭을 고려하지 않은 환경을 가정하였다. 단일 셀 환경에 M개의 안테나를 가진 기지국이 하나의 안테나를 가진 한 명의 사용자만을 지원하며, 기지국과 사용자 사이의 채널은 크기가 $M \times 1$ 인 벡터 \mathbf{h} 로 나타낸다. 기지국은 E_s 의 파워를 가지는 송신 신호 x 를 크기가 $M \times 1$ 인 단위 벡터 빔 (beam) \mathbf{v} 에 실어서 송신하며, 이때 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y = \mathbf{h}^H \mathbf{v} x + n \quad (1)$$

여기서 n 은 분산이 N_0 인 백색 가우시안 잡음 (white Gaussian noise) 이다. 이때 송신 신호 대 잡음 비 (signal to noise ratio, SNR) 는 E_s/N_0 이며, 수신 단에서의 성능을 나타내는 지표인 수신 신호 대 잡음 비는 다음과 같이 계산된다.

$$SNR_r = \frac{|\mathbf{h}^H \mathbf{v}|^2 E_s}{N_0} = \frac{\|\mathbf{h}\|^2 |\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{v}|^2 E_s}{N_0} \quad (2)$$

여기서 $\bar{\mathbf{h}}$ 는 $\mathbf{h}/\|\mathbf{h}\|$ 로, 채널의 방향을 나타내는 단위 벡터이다. $|\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{v}|$ 은 채널 방향과 빔 사이의 유사도이며, 두 단위 벡터의 방향이 일치할수록 1에 가까워지고 직교할수록 0에 가까워진다. 피드백 정보의 양이 무한하다면 기지국에서 완벽한 채널 정보를 알 수 있게 되고, 빔 $\mathbf{v}=\bar{\mathbf{h}}$ 를 사용해 $SNR_r = \|\mathbf{h}\|^2 E_s/N_0$ 를 얻을 수 있다. 하지만 실제로 피드백의 양은 제한되어 있기 때문에 채널 정보는 양자화되어 기지국에 전달되어 성능 열화가 생긴다. 피드백 비트가 B 개일 때, 수식 (2)는 다음과 같이 근사화 시킬 수 있다¹¹.

$$SNR_r \approx \frac{\|\mathbf{h}\|^2 (1 - 2^{-B/(M-1)}) E_s}{N_0} \quad (3)$$

수식 (3)은 피드백 비트 수 B 가 무한에 가까워질수록 수신 신호 대 잡음 비는 $\|\mathbf{h}\|^2 E_s/N_0$ 에 가까워지고, 유한하다면 양자화로 인한 성능 열화가 생김을 보여 준다.

주파수 분할 하향링크 시스템에서는 상향링크와 하향링크의 채널이 다르기 때문에 다음의 3단계를 거쳐 채널 정보가 기지국에게 전달된다. 첫째, 기지국이 전송한 파일럿 (pilot) 신호를 통해 사용자가 하향링크 채널을 추정한다. 앞에서 언급했듯이, 본 논문은 피드백의 영향에만 집중하기 위해, 여기서 발생하는 채널 추정 오류는 없다고 가정한다. 둘째, 사용자가 $L=2^B$ 개의 단위 벡터로 구성된 코드북 $\mathbf{W}=[\mathbf{w}_1 \dots \mathbf{w}_L]$ 에서 채널과 가장 유사도가 높은 단위 벡터의 인덱스 l^* 를 찾아낸다.

$$l^* = \arg \max_{1 \leq l \leq L} |\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{w}_l| \quad (4)$$

셋째, 수식 (4)에서 선택된 단위 벡터의 인덱스 l^* 를 기지국에게 피드백해준다. 기지국과 사용자는 코드북을 공유하고 있기 때문에, 피드백 받은 인덱스를 이용하여 기지국은 \mathbf{w}_{l^*} 를 찾아내어 빔 \mathbf{v} 로 사용할 수 있다.

이러한 시스템에서 데이터 전송량이나 비트 오류 확률 (bit error rate, BER) 같은 성능은 코드북 \mathbf{W} 가 채널의 방향을 얼마나 잘 양자화했는지에 결정된다. 수신단 안테나가 하나이고 채널이 Rayleigh 분포를 따를 때 채널 방향의 분포는 그림 2에 도시된 M 차원 구 (hyperbolic sphere) 의 형태를 갖는다. 단위 벡터 \mathbf{w}_l 와 λ 이상의 유사도를 갖는 채널 방향의 영역은 M 차원 구형 캡 (spherical cap) C_l 의 형태로 나타난다.

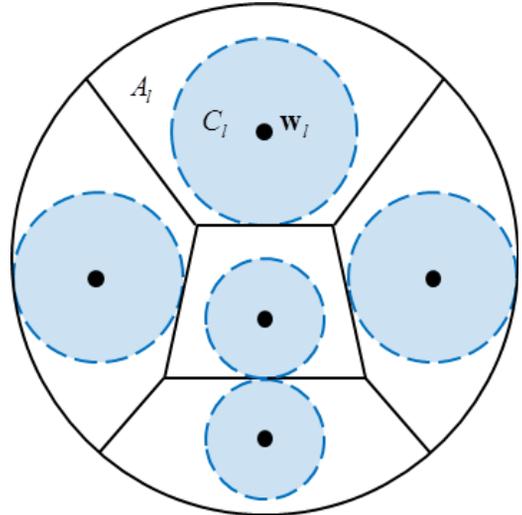


그림 2. M 차원 구와 구형 캡
Fig. 2. M dimensional hyperbolic sphere and spherical cap

$$C_l = \{\bar{\mathbf{h}}: |\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{w}_l| > \lambda\} \quad (5)$$

C_l 의 크기는 λ 가 1에 가까워질수록 작아지고 0에 가까워질수록 커진다. 실제 단위 벡터 \mathbf{w}_l 로 양자화되는 영역 A_l 를 수식적으로 표현하기는 어렵기 때문에 C_l 로 근사화하여 표현할 수 있다. 결국 전체 코드북으로 표현되는 영역은 $\bigcup_{l=1}^L C_l$ 와 같다. 전체 코드북으로 표현되는 영역을 최대화시키기 위해서는 모든 C_l 이 겹치지 않는 상태로 λ 를 최소화 시켜야 한다. 이를 Grassmannian 기준이라 하며, 다음과 같이 수식적으로 표현할 수 있다⁹.

$$\text{minimize} \quad \max_{1 \leq l < m \leq L} r_{l,m} \quad (6)$$

여기서 $r_{l,m} = |\mathbf{w}_l^H \mathbf{w}_m|$ 으로, 단위 벡터 \mathbf{w}_l 과 \mathbf{w}_m 간 유사도를 의미한다. 수식 (6)은 코드북 내 최대 유사도를 최소화시킴으로써 전체적으로 단위 벡터 간 유사도가 감소할 수 있게 하여 제한된 피드백으로도 효율적으로 채널 정보를 기지국에게 전달할 수 있음을 의미한다. Grassmannian 기준은 위와 같은 환경에서 최적의 코드북을 만드는 기준으로 알려져 있다.

Ⅲ. 거대 다중 안테나 시스템을 위한 코드북 형성 기법

본 장에서는 간단히 낮은 최대 유사도를 갖는 코드북을 형성할 수 있어 기존 다중 안테나 시스템에서 많이 연구된 DFT 코드북 형성 기법을 소개하고, 이 코드북이 거대 다중 안테나 시스템에 부적합한 이유와 그 문제를 해결하기 위한 방법들을 소개한다. DFT 수식의 자연 상수 부분을 이용하면 다음과 같이 간단히 단위 벡터를 형성할 수 있다.

$$\mathbf{w}_{DFT,l} = \frac{1}{\sqrt{M}} [e^{j2\pi u_1(l-1)/L} \dots e^{j2\pi u_M(l-1)/L}]^T \quad (7)$$

이러한 단위 벡터 L 개를 열로 갖고 있는 코드북을 DFT 코드북이라 한다¹⁰⁾. 여기서 DFT 수식의 주파수에 해당하는 계수인 $\{u_1, \dots, u_M\}$ 은 각각 0에서 $L-1$ 의 사이 값을 가지며, 이 값에 따라서 DFT 코드북의 최대 유사도가 결정된다. Grassmannian 기준을 충족시키는 계수는 닫힌 형태 (closed form) 으로는 구할 수 없으며, M 개의 계수들로 구성할 수 있는 모든 조합 L^M 개의 최대 유사도를 비교해야 한다.

$$\begin{aligned} \{u_1^*, \dots, u_M^*\} = \\ \arg \min_{\substack{0 \leq u_p \leq L-1 \\ 1 \leq p \leq M}} \max_{\substack{1 \leq l < m \leq L}} r_{l,m} \end{aligned} \quad (8)$$

이러한 특징 때문에 DFT 코드북은 거대 다중 안테나 시스템에서 형성이 어렵다. 안테나가 32개이고 코드북의 길이가 64인 거대 다중 안테나 시스템의 예를 들면, 전체 경우의 수는 2.1×10^{96} 가지로 코드북 형성이 오프라인 과정일지라도 현실적으로 구현이 불가능한 수치이다. 본 논문에서는 이 경우의 수를 대폭적으로 감소시킬 수 있는 방안으로 두 가지를 제안하였다.

3.1. 반복적 코드북 형성 기법

위의 경우의 수 문제는 M 개의 계수를 동시에 고려하는데서 발생하기 때문에, 본 논문은 안테나 별로 계수를 변화시킴으로써 유사도 비교 횟수를 대폭적으로 줄이는 기법을 제안하였다. 비교 횟수를 줄이면서도 Grassmannian 기준을 최대한 만족시키기 위해 최대 유사도가 줄어들 때까지 전체 과정을 반복한다. 이 기법은 그림 3에 도시되어 있으며, DFT 코드북을 형성할 때 (반복 횟수) $\times LM$ 번 유사도를 비교한다. 안테나 수에 지수적이 아닌 선형적으로 비교 횟수가 증가

```

initialization  $\{u_1, u_2, \dots, u_M\} = \{0, 0, \dots, 0\}, r_{\min} = \infty$ 
do{
  for ( $p=1:M$ ){
    for ( $k=0:L-1$ ){
       $u_p = k, r_{\max} = \max_{1 \leq l < m \leq L} |\mathbf{w}_{DFT,l}^H \mathbf{w}_{DFT,m}|$ 
      if ( $r_{\max} < r_{\min}$ ){
         $r_{\min} = r_{\max}, u_{opt,p} = k$ 
      }
       $u_p = u_{opt,p}$ 
    }
  } while {coefficients are updated}
  
```

그림 3. 거대 다중 안테나 시스템에 적합한 반복적 DFT 코드북 형성 기법
Fig. 3. Iterative DFT codebook generation scheme for amssive MIMO system

하므로, 거대 다중 안테나 시스템에서도 낮은 최대 유사도를 갖는 DFT 코드북을 형성할 수 있다. 전체의 경우의 수를 비교할 때보다는 성능 손실이 생기지만, 그 정도가 매우 적음을 실험 결과 장에서 보이겠다.

3.2. 재귀적 코드북 형성 기법

만약, 기지국 안테나 수 M 과 코드북 길이 L 이 특정 관계에 있다면, 더욱 간단하게 코드북을 형성할 수 있다. $\{u_1, \dots, u_M\} = \{1, \dots, M\}$ 일 때 단위 벡터 간 유사도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_l^H \mathbf{w}_m &= \frac{1}{M} \sum_{p=1}^M e^{j2\pi p(m-l)/L} \\ &= \frac{e^{j2\pi(M+1)(m-l)/L} - e^{j2\pi(m-l)/L}}{M(e^{j2\pi(m-l)/L} - 1)} \end{aligned} \quad (9)$$

이때, 단위 벡터 간 유사도는 단위 벡터의 인덱스와 관계없이 $L=M$ 일 때는 0이 되고, $L=M+1$ 일 때는 $1/M$ 이 된다. 유사도가 일정하면 최대 유사도와 최소 유사도가 일치하기 때문에, Grassmannian 기준을 최대한 충족시키는 최적의 코드북을 형성할 수 있다. 그러나 수식 (3)에서 볼 수 있듯이, 코드북 길이가 기지국 안테나 수와 비슷하다면 양자화 오류로 인한 성능손실이 커지게 된다. 이럴 때는 코드북 간 Kronecker 곱을 이용하여 안테나 수 대비 코드북 길이를 증가시킬 수 있다.

$$\mathbf{W}_K \otimes (\dots \mathbf{W}_2 \otimes \mathbf{W}_1) = \mathbf{W} \quad (10)$$

코드북 \mathbf{W}_k 의 크기가 $M_k \times L_k$ 이고 최대 유사도가 $r_{\max,k}$ 일 때, 코드북 \mathbf{W} 의 크기는 $\prod_{k=1}^K M_k \times$

```

initialization  $r_{\max} = -\infty$ 
for ( $l = 1 : L$ ){
     $r = |\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{w}_l|$ 
    if ( $r > \lambda_l$ ){
         $\mathbf{v} = \mathbf{w}_{l^*}$ , end}
    if ( $r > r_{\max}$ ){
         $r_{\max} = r$ ,  $l^* = l$ }
     $\mathbf{v} = \mathbf{w}_{l^*}$ , end
}
    
```

그림 4. 거대 다중 안테나 시스템에 적합한 DFT 코드북 검색 기법
Fig. 4. DFT codebook search scheme for massive MIMO system

$\prod_{k=1}^K L_k$ 가 되고 최대 유사도는 $\max_{1 \leq k \leq K} r_{\max,k}$ 가 된다. 이러한 재귀적인 (recursive) 기법은 간단하게 거대 다중 안테나 시스템에 적합한 코드북을 형성할 수 있게 해줄뿐더러, 기존 다중 안테나 시스템의 코드북을 이용해 거대 다중 안테나 시스템의 코드북을 형성할 수 있게 하여 하위 호환성도 보장해준다. 그러나 안테나 수와 코드북 길이에 제약이 있다는 단점이 있다.

IV. 거대 다중 안테나 시스템을 위한 코드북 검색 기법

수식 (4)와 같이 단위 벡터의 인덱스를 검색하는 경우, 채널과 코드북 내 모든 단위 벡터 사이의 유사도를 계산하여 그 값을 비교하는 과정이 필요하다. 거대 다중 안테나 시스템에서는 유사도 하나를 계산하는데 많은 연산이 사용될 뿐만 아니라 비교해야할 유사도의 수도 급증하기 때문에 기존의 코드북 검색 기법을 그대로 사용할 경우 실시간 통신시스템에서 딜레이 문제가 생길 수 있다. 그림 4는 본 논문에서 이를 해결하기 위해 제안한 코드북 검색 기법으로, 단위 벡터와 채널 간 유사도가 일정 한계점 (threshold) λ_l 을 넘으면 현재 단위 벡터가 충분히 채널 방향을 잘 표현한다고 판단하여 검색을 중지함으로써 검색 시간을 감소시킬 수 있다. 한계점 λ_l 이 1에 가까워질수록 성능 손실은 없지만 검색 시간의 감소가 적고 0에 가까워질수록 성능 손실이 커지고 검색 시간이 대폭 감소하

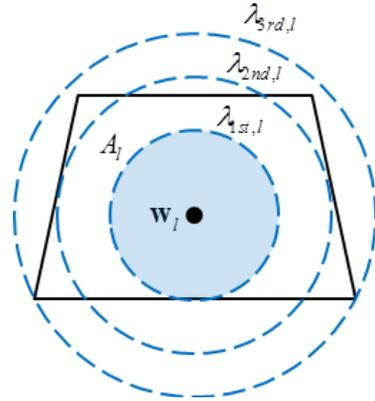


그림 5. 제안 코드북 검색 기법에 사용되는 3가지 한계점
Fig. 5. Three thresholds for proposed codebook search scheme

기 때문에, 약간의 성능 손실로도 대폭적으로 검색 시간을 감소시킬 수 있는 한계점을 찾는 것이 중요하다. 본 논문에서는 3가지의 한계점을 제시하였고, 각 한계점에 해당하는 성능 손실과 검색 시간 감소를 비교 분석하였다.

4.1. $A_l \supset C_l$ 인 경우

제안 기법은 그림 5를 통해 기하학적으로 해석할 수 있다. 기존 기법이 영역 A_l 안에 속하는 채널 방향을 단위 벡터 \mathbf{w}_l 로 양자화 시켰다면, 제안 기법은 구형 캡 C_l 에 속한 채널 방향을 \mathbf{w}_l 로 양자화 시켜 검색 시간을 감소시킨다. 그렇기 때문에, A_l 안에 C_l 가 최대한 크게 들어간다면 성능 손실 없이 검색 시간을 줄일 수 있다. 이 한계점은 $\lambda_{1st,l}$ 로 나타내며, 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \lambda_{1st,l} &= \max_{\bar{\mathbf{h}} \in A_l, m \neq l} |\bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{w}_m| \\
 &= \max_{m \neq l} \sqrt{(1+r_{l,m})/2}
 \end{aligned} \tag{11}$$

이 한계점은 최적의 조건을 갖추고 있지만, 채널 방향이 C_l 에 속할 확률이 $(1-\lambda_l^2)^{M-1}$ 이기 때문에 거대 다중 안테나 환경에서는 그 확률이 0에 가까워져 검색 시간 감소 효과를 기대하기 힘들다⁹⁾. 이를 개선하기 위해 약간의 성능 손실을 감수하더라도 검색 시간을 대폭적으로 줄일 수 있는 C_l 의 크기를 구하는 것이 필요하다.

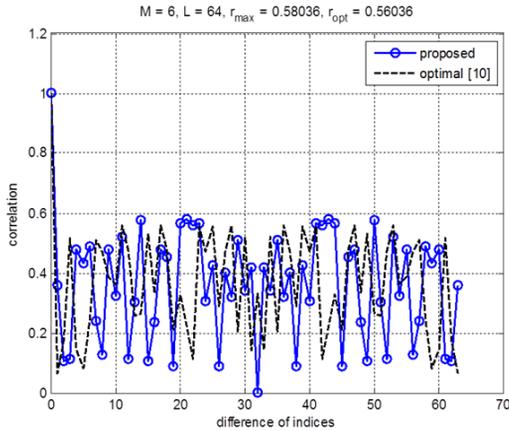


그림 6. [10]의 최적 DFT 코드북과 제안하는 반복적으로 형성된 DFT 코드북의 유사도 비교
Fig. 6. Comparison of correlations of optimal DFT codebook in [10] and proposed iteratively generated DFT codebook

4.2. $P(A_i) = P(C_i)$ 인 경우

다음으로는 C_i 와 A_i 의 크기를 같게 하는 한계점을 생각해 볼 수 있다. 이 경우에는 C_i 의 영역 중 A_i 에 포함되지 않는 부분이 생기기 때문에 성능 손실이 생기지만, C_i 의 크기가 작지 않기 때문에 검색 시간 감소 효과를 기대해볼 수 있다. 영역 A_i 의 크기는 정확히 구하기가 어려우므로, 코드북이 채널 방향을 잘 양자화 했다는 가정 하에 M 차원 구의 겹넓이의 $1/L$ 로 근사화할 수 있다. 이때의 한계점은 $(1 - \lambda_{2nd,l}^2)^{M-1} = 1/L$ 을 풀면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_{2nd,l} = \sqrt{1 - 2^{-B/(M-1)}} \quad (12)$$

4.3. $A_i \subset C_i$ 인 경우

마지막으로 C_i 가 A_i 를 포함하는 한계점을 생각해 볼 수 있다. 이 때는 성능 손실이 가장 커지지만, 그만큼 검색 시간을 대폭적으로 감소시킬 수 있다. 이 때의 한계점 $\lambda_{3rd,l}$ 은 수식적으로 구하기 어려우며, 실험을 통해 단위 벡터 w_l 로 양자화되는 채널 방향과의 유사도 중 가장 낮은 것을 선택해야 한다.

V. 모의 실험 결과

본 장에서는 앞서 소개한 기법들의 성능을 여러 가지 측면에서 비교분석하였다. DFT 코드북의 유사도 $r_{l,m} = |w_l^H w_m|$ 는 수식 (9)에서 볼 수 있듯이 단위 벡터 인덱스의 차이 $m-l$ 의 영향을 받기 때문

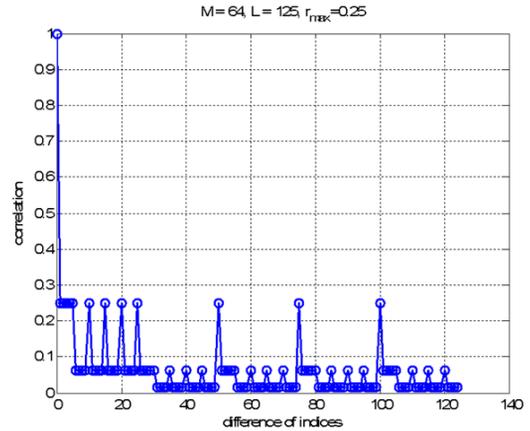


그림 7. 제안하는 재귀적으로 형성된 DFT 코드북의 유사도
Fig. 7. Correlation of proposed recursively generated DFT codebook

에 이에 따른 유사도를 관찰하여 Grassmannian 기준이 충족된 정도를 평가하였다.

그림 6은 기지국 안테나가 6개이고 코드북 크기가 64일 때, 모든 계수를 동시에 고려하는 기존의 DFT 코드북 형성 기법과 안테나 별로 계수를 찾는 제안 DFT 코드북 형성 기법의 유사도이다. 기존의 DFT 코드북 형성 기법은 [10]에 나와 있는 최적 계수 $\{u_1, \dots, u_6\} = \{1, 18, 23, 39, 46, 57\}$ 를 사용하였다. 기존 기법은 $64^6 = 6.87 \times 10^{10}$ 번의 유사도 비교를 수행한 반면 제안 기법은 오직 $3 \times 64 \times 6 = 1152$ 번의 유사도 비교를 수행하여 비슷한 최대 유사도를 얻을 수 있음을 알 수 있다. III-1에서 언급했듯이, 기존 기법은 L^M 번의 유사도 비교를 필요로 하고 제안 기법은 (반복 횟수) $\times LM$ 번의 유사도 비교를 필요로 하므로 이 차이는 거대 다중 안테나 환경으로 가면 더욱 극대화 될 것이다. 현재 거대 다중 안테나 환경에서 최적 DFT 계수는 실험적으로 구하는 것이 불가능하기 때문에 이 때의 실험 결과는 포함되지 않았다.

그림 7은 크기가 4×5 인 DFT 코드북을 이용하여 재귀적으로 형성한 크기가 64×125 인 거대 다중 안테나 시스템용 DFT 코드북의 유사도이다. 계수를 찾는 복잡한 과정이 없음에도 최대 유사도가 낮은 거대 다중 시스템용 코드북을 쉽게 형성할 수 있다. 최대 유사도가 $1/M = 0.25$ 인 코드북을 기반으로 형성되었기에, 재귀적으로 형성된 코드북의 최대 유사도 역시 0.25임을 확인할 수 있다.

그림 8은 기지국 안테나가 64개, 코드북 크기가 128개이고 송신 신호 대 잡음 비가 10db일 때, 3가지 한계점 $\lambda_{1st,l}$, $\lambda_{2nd,l}$, $\lambda_{3rd,l}$ 의 검색 시간 감소와 성능

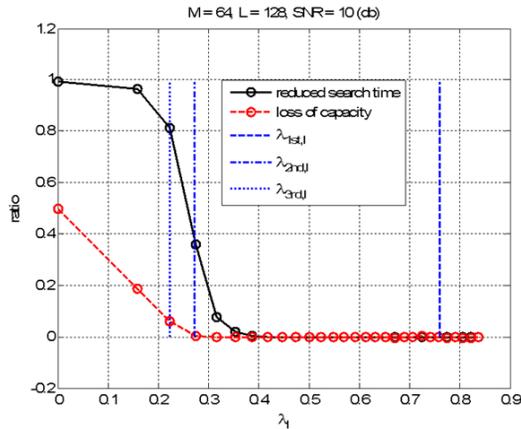


그림 8. 제안하는 코드북 검색 기법의 검색 시간 감소와 성능 손실 비율
 Fig. 8. Ratio of reduced search time and loss of capacity for proposed codebook search scheme

손실의 비율이다. 성능은 채널 용량 (capacity) $E\{\log_2(1 + SNR_r)\}$ 로 측정하였고, 검색 시간 감소와 성능 손실의 비율은 기존 기법을 기준으로 측정하였다. 한계점 $\lambda_{1st,l}$ 을 사용할 경우, 성능 손실은 존재하지 않지만 거대 다중 안테나 환경에서 구형 캡 C_l 의 크기가 매우 작기 때문에 검색 시간 감소 역시 거의 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 반면 한계점 $\lambda_{2nd,l}$ 는 성능 손실이 거의 없음에도 구형 캡의 크기가 M 차원 구의 $1/L$ 로 대폭 증가하였기 때문에, 약 40%가량 검색 시간을 감소시켜준다. 한계점 $\lambda_{3rd,l}$ 는 구형 캡의 크기가 가장 크기 때문에 성능 손실이 7%정도로 심한 반면, 검색 시간을 80%로 대폭 감소시켜준다. 각 한계점 별로 장단점이 존재하기에 시스템에 적합한 성능을 얻는 한계점을 사용해야 함을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문은 기존 DFT 코드북에서 최적 계수를 찾는 방법을 거대 다중 안테나 시스템에 그대로 적용할 경우 현실적으로 구현할 수 없는 횡수의 유사도 비교를 수행해야 하기 때문에, 안테나 별로 계수를 찾거나 재귀적으로 코드북을 형성하여 필요한 자원을 대폭 감소시킨 기법들을 제안하였다. 뿐만 아니라, 거대 다중 안테나 시스템에서는 코드북 검색에도 오랜 시간이 필요하기 때문에 유사도가 일정 한 계값 이상일 경우 검색을 중지시킴으로써 검색 시간을 감소시키는 기법 또한 제안하였다. 실험 결과를 통해 안테나 수가 6이고 코드북 크기가 64일

때 제안하는 코드북 형성 기법은 기존 기법과 유사한 성능을 가지면서도 필요한 유사도 비교 횡수를 6.87×10^{10} 에서 1152로 줄였고, 안테나 수가 64이고 코드북 크기가 128일 때 제안하는 코드북 검색 기법은 기존 기법과 유사한 성능을 가지면서도 검색 시간을 약 40%가량 줄일 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과들은 거대 다중 안테나 시스템에서도 코드북 기반의 채널 정보 피드백 기법을 적용할 수 있음을 의미한다.

References

- [1] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shafi, P.J. Smith, and A. Naguib, "From theory to practice: an overview of MIMO space time coded wireless systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 281-302, Apr. 2003.
- [2] H. Ku, J. Kang, I. Choi, D. Kwon, and C. Lee, "A multiuser MIMO precoder with full feedback," in *Proc. KICS Fall Conf.*, pp. 1015-1018, Incheon, Korea, Nov. 2006.
- [3] C. B. Peel, B. M. Hochwald, and A. L. Swindlehurst, "A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication-part I: channel inversion and regularization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 1, pp. 195-202, Jan. 2005.
- [4] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [5] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449, Apr. 2013.
- [6] J. Hoydis, S. ten Brink, and M. Debbach, "Massive MIMO: how many antennas do we need?," in *Proc. 49th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, Comput.*, pp. 545 - 550, Monticello, U.S.A., Sep. 2011.
- [7] G. Xiang, O. Edfors, F. Rusek, and F. Tufvesson, "Linear pre-coding performance in

measured very-large MIMO channels,” in *Proc. 2011 IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Fall)*, pp. 1-5, San Francisco, Sep. 2011.

- [8] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and S. Vishwanath, “Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2640-2651, Aug. 2011.
- [9] K. K. Mukkavilli, A. Sabharwal, E. Erkip, and B. Aazhang, “On beamforming with finite rate feedback in multiple-antenna systems,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2562-2579, Oct. 2003.
- [10] B. M. Hochwald, T. L. Mazetta, T. J. Richardson, W. Sweldens, and R. Urbanke, “Systematic design of unitary space-time constellations,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, no. 6, pp. 1962-1973, Sep. 2000.
- [11] N. Jindal, “MIMO broadcast channels with finite-rate feedback,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 11, pp. 5045-5060, Nov. 2006.

최 일 규 (Il-gyu Choi)



2009년 2월 연세대학교 전기
전자공학과 졸업
2009년 3월~현재 연세대학교
전기전자공학과 석박사통합
과정
<관심분야> 통신신호처리,
MIMO 시스템

노 훈 동 (Hoon-dong Noh)



2008년 2월 연세대학교 전기
전자공학과 졸업
2008년 3월~현재 연세대학교
전기전자공학과 석박사통합
과정
<관심분야> massive MIMO
네트워크

이 충 용 (Chung-yong Lee)



1995년 Georgia Institute of
Technology 박사 졸업
1996년~1997년 삼성전자 연
구원
1997년~현재 연세대학교 전
기전자공학과 교수
<관심분야> 통신신호처리, 어
레이신호처리, MIMO 시스템