

논문 2015-52-7-4

공간 채널 모델의 통계적 특성을 활용하는 MIMO 시스템의 코드북 결정 및 성능 평가

(Determination and Performance Evaluation of a Codebook for MIMO Systems Utilizing Statistical Properties of The Spatial Channel Model)

서 준 엽*, 강 호 식*, 성 원 진**

(Junyeub Suh, Hosik Kang, and Wonjin Sung[Ⓢ])

요 약

LTE (long-term evolution) MIMO 시스템에서는 제한된 피드백 환경 하에서 추정된 채널 정보를 활용하기 위한 코드북이 사용되고 있으며, 이와 관련된 연구도 활발히 진행되었다. 기존에 활용된 방식으로는 VQ (vector quantization) 기반 및 DFT (discrete fourier transform) 기반으로 생성된 코드벡터를 활용하는 코드북이 있으며, LTE 표준에서도 이를 변형한 방식을 최대 8개의 송신 안테나에 대해 적용할 수 있게 규정하고 있다. 그러나 안테나 개수가 추가적으로 증가하고, 공간 채널 모델이 LTE 시스템 전송 성능 평가에 기본적인 모델로 활용됨에 따라, 이에 따른 새로운 빔포밍 방안 및 코드북 설계가 필요하다. 본 논문에서는 LTE 전송 성능 평가에 활용되는 3차원 공간 채널 모델 (3D Spatial Channel Model; 3D-SCM)의 구현을 통해 생성된 채널의 핵심적인 통계적 특성을 분석하고, 이에 따른 코드북 설계의 방향성을 제시하고자 한다. 특히 DFT 기반 코드북 활용 시, 기존의 균일위상 DFT 코드북을 개선한 비균일위상 DFT 코드북을 제안하고, 주어진 SCM 환경에서 성능을 평가한다. 코드북 설계에 필요한 인접한 안테나 원소 간의 위상차의 통계적 특성의 경우 SCM에서 뚜렷한 경향성이 존재하며, 이를 적절히 활용함으로써 기존 방식 대비 이득을 발생시킬 수 있다.

Abstract

For long-term evolution (LTE) MIMO transmission, codebooks are used to utilize the estimated channel information under the limited feedback environment, and related study has been actively performed. Existing codebooks include codevectors constructed based on vector quantization (VQ) and discrete Fourier transform (DFT), and the LTE standard specifies codebooks modified from these examples to support up to 8 transmit antennas. As the number of antennas increases and as the spatial channel model is used as a standard environment to evaluate the LTE transmission performance, new beamforming methods as well as codebook designs are needed. In this paper, we implement the 3-dimensional spatial channel model (3D-SCM) to analyze the key statistical characteristics of the generated channel, and present efficient ways of determining corresponding codebooks. In particular, we propose a nonuniform-phase DFT-based codebook to improve the existing uniform-phase DFT-based codebook, and evaluate its performance under the given SCM transmission environment. There exists a strong tendency in statistical distributions of the phase difference between adjacent antenna elements for the SCM, which can be appropriately exploited in codebook design to produce a performance gain over the existing design.

Keywords : MIMO, 3D-SCM, CSI, feedback, codebook, DFT, VQ.

* 학생회원, ** 평생회원, 서강대학교 전자공학과

(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: wsung@sogang.ac.kr)

※ 본 논문은 한국연구재단 (2014R1A2A2A01003558) 및 LG전자의 지원으로 수행된 연구 결과임.

Received ; April 16, 2015 Revised ; June 15, 2015 Accepted ; June 29, 2015

I. 서 론

코드북은 다수의 송수신 안테나를 사용하는 MIMO (multiple-input multiple-output) 시스템에서 제한된 피드백 양을 기반으로 데이터 송신을 효과적으로 수행하기 위한 중요한 요소이다.^[1] 안테나 개수의 증가에 따라 데이터 전송률의 증가를 기대할 수 있으나, 안테나 개수의 증가는 서브프레임마다 전송하는 CSI-RS (Channel State Information-Reference Signal) 양의 증가 및 제한 정보의 양의 증가도 의미하게 된다.^[2] 따라서 MIMO 시스템에서는 제한된 제한 정보의 양으로 채널 정보를 효율적으로 전달하는 방안이 필요하며,^[3] 제한 전달된 채널 정보를 기반으로 적절한 코드백터를 사용하여 신호를 전송하게 된다. 코드백터의 생성은 DFT (discrete fourier transform) 행렬을 기반으로 이루어질 수 있으며^[4], DFT 코드북을 개량하여 상관관계의 유무에 따라 적용 가능한 코드북에 대한 연구도 진행되었다.^[5] VQ 알고리즘을 활용하여 주어진 채널의 통계적 특성에 맞게 생성될 수도 있으며 Lloyd-Max 알고리즘을 이용한 VQ 코드북에 대한 연구가 진행되었다.^[6] LTE 시스템에서 사용되는 코드백터들은 [7]에 정의되어 있다. 각각의 코드북은 주어진 환경에 따라 성능이 상이하며 상관관계의 유무에 따른 코드북의 성능 평가가 연구되었다.^[8]

3D-SCM은 3차원적인 위치 정보를 포함하는 채널 모델로서, 기존의 2D-SCM 대비 고층 빌딩 등이 다수 존재하는 도심 환경에서 실재가 근접한 채널 환경을 제공하는 특징이 있다.^[9] 본 논문에서는 3D-SCM 이 적용된 멀티셀 시스템에서 LTE 단말 사용자의 하향링크 전송 성능을 향상시키기 위해 적합한 코드북이 가져야 하는 특성을 찾기 위해 3D-SCM의 통계적 특성을 분석하였다. 특히 인접 안테나 원소간의 위상차의 확률분포 함수 및 평균, 표준편차 등의 정보를 바탕으로 주요 특성을 관찰하고, 이에 적합한 코드북이 가져야 하는 특성을 제시하였다. 제안 코드북과 기존의 DFT 및 VQ 기반 코드북의 성능을 비교하고, 또한 LTE 코드북과의 성능 비교도 수행하였다. 본 논문의 II장에서는 3D-SCM을 소개하고, III장에서는 기존 코드북을 제시하고, IV장에서는 SCM 환경 특성을 고려한 비균일위상 DFT 코드북을 제안하며, V장에서 결론을 맺는다.

II. 공간 채널 모델

1. 3D-SCM

3GPP TR 36.873 문서를 기반으로 3D-SCM 모델을 구축하였다. 기존 2D-SCM은 단말기의 2차원적인 평면 위치에 의해서 채널이 형성된 반면, 3D-SCM은 고층 빌딩에 위치한 사용자들의 위치를 고려하여 단말기의 높이 정보가 추가되어 3차원적인 위치에 따라 수직 각도와 수평 각도에 의해서 채널이 형성된다.^[10] 기존 채널 모델들은 통계적인 방법 또는 확정적인 방법을 사용하며 각각의 방법에는 극복해야할 단점이 존재한다. 하지만 3D-SCM은 전파의 물리적 현상을 이용한 확정적인 방법과 채널 파라미터를 확률적으로 생성시켜 결합하여 두 가지 방법을 결합한 방식을 사용함으로써 기존 채널 모델들의 단점을 보완한다. 그림 1은 3D-SCM의 개념도이다.

3D-SCM은 사용자를 3차원 공간에 배치하고 기지국과 사용자 사이의 방위각과 천정각을 설정한다. 그리고 사용자를 실내 또는 실외에 있을 확률을 8:2로 설정하고 실내 또는 실외의 상황, 거리 그리고 사용자 안테나 높이에 따라서 LOS (line of sight) 확률을 계산한다. 그 다음 3D-SCM에는 UMa (urban macro), UMi (urban micro) 그리고 Uma-H (urban macro cell with one high-rise)의 각 시나리오 별로 경로 감쇄 (path loss)를 계산하고 LSP (large scale parameter), 지연 시간, 클러스터 전력, 보조 경로 등을 계산하고 이 값들을 통합하여 채널을 형성한다.

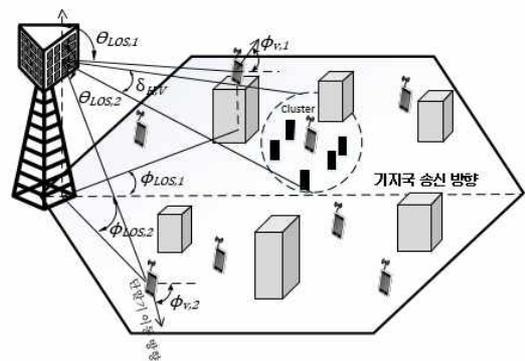


그림 1. 3D-SCM 개념도
Fig. 1. Overview of 3D-SCM.

$$\begin{aligned}
H_{u,s,n} = & \sqrt{\left(\frac{P_n}{M}\right)} \sum_{m=1}^M \left[\begin{array}{l} F_{rx,u,\theta}(\theta_{n,m,ZoA}, \phi_{n,m,AoA}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{n,m,ZoA}, \phi_{n,m,AoA}) \end{array} \right]^T \\
& \left[\begin{array}{cc} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\phi}) \\ \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\theta}) & \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\phi}) \end{array} \right] \\
& \left[\begin{array}{l} F_{tx,s,\theta}(\theta_{n,m,ZoD}, \phi_{n,m,AoD}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{n,m,ZoD}, \phi_{n,m,AoD}) \end{array} \right] \\
& \exp(j2\pi\lambda_0^{-1}(\hat{r}_{rx,n,m}^T \bar{d}_{rx,u})) \\
& \exp(j2\pi\lambda_0^{-1}(\hat{r}_{tx,n,m}^T \bar{d}_{tx,s})) \exp(j2\pi v_{n,m} t) \quad (1)
\end{aligned}$$

채널 계수는 식 (1)에 의해 결정되며 M 은 안테나 개수, λ_0 는 전파 파장, ZoA (zenith of arrival)와 ZoD (zenith of departure)는 각각 도착 천정각과 출발 천정각 그리고 AoA (azimuth of arrival)와 AoD (azimuth of departure)는 각각 도착 방위각과 출발 방위각을 나타낸다. 이에 따라 m 번째 전파의 n 번째 클러스터의 도착 천정각은 $\theta_{n,m,ZoA}$, 출발 천정각은 $\theta_{n,m,ZoD}$ 로 나타내며 방위각에 대한 도착 각과 출발 각은 $\phi_{n,m,AoA}$ 와 $\phi_{n,m,AoD}$, 속도는 $v_{n,m}$ 으로 나타낼 수 있다. 그리고 P_n 은 n 번째 클러스터의 전력, $\kappa_{n,m}$ 은 m 번째 전파, n 번째 클러스터의 교차 편파의 전력 비 (XPR, cross polarization power ratios)를 나타내며 $F_{rx,u,\theta}$ 와 $F_{rx,u,\phi}$ 는 천정각 θ 와 방위각 ϕ 에 대한 수신 안테나 원소 u 의 field pattern이며 $F_{tx,s,\theta}$ 와 $F_{tx,s,\phi}$ 는 θ 와 ϕ 에 대한 송신 안테나 원소 s 의 field pattern이다. $\Phi_{n,m}$ 은 랜덤 초기 위상이며 $(\theta\theta, \theta\phi, \phi\theta, \phi\phi)$ 의 네 가지 조합에 따른 종류가 있으며 각각의 종류는 오른쪽 위에 표시되어 있다. $\hat{r}_{tx,n,m}$ 는 (2)의 식을 따르며 방위각과 천정각의 도착 위상 $\phi_{n,m,ZoA}$ 와 $\theta_{n,m,ZoA}$ 에 의해서 결정된다. $(\cdot)^T$ 는 전치 행렬을 나타낸다.

$$\hat{r}_{tx,n,m} = \begin{bmatrix} \sin\theta_{n,m,ZoA} \cos\phi_{n,m,AoA} \\ \sin\theta_{n,m,ZoA} \sin\phi_{n,m,AoA} \\ \cos\theta_{n,m,ZoA} \end{bmatrix} \quad (2)$$

본 논문에서는 UMa 시나리오를 가정하였으며 지구국은 M 개의 안테나를 갖으며 가로 배열 또는 세로 배열로 이루어진 2가지 형태에 대해서 성능을 평가한다. 단말기 안테나 개수는 N 으로 설정하였으며 지구국으로부터 받는 신호 벡터 \mathbf{y} 는

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{w}_i\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_M]$ 는 하향 링크 채널 행렬이며 3D-SCM을 적용한 채널이다. \mathbf{w}_i 는 $M \times 1$ 의 열 벡터로 n 비트 코드북 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1 \dots \mathbf{w}_{2^n}]$ 의 코드벡터이며 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_M]$ 는 송신되는 데이터 벡터, \mathbf{n} 은 분산이 N_0 인 가우시안 잡음을 나타내며 $E[\cdot]$ 는 평균을 나타낸다. 정규화 채널 벡터를 $\bar{\mathbf{h}} = \mathbf{h}/|\mathbf{h}|$ 라 할 때, 성능 평가 지표로 사용한 상관지표 μ 는

$$\mu = \max_i \{\bar{\mathbf{h}}\mathbf{w}_i\} \quad (4)$$

이며 이는 선택된 코드벡터와 채널의 상관도를 확인할 수 있는 지표이다. 채널 정보가 완벽한 상태에서의 코드 벡터 \mathbf{w}_{csit} 는 $\bar{\mathbf{h}}$ 의 공액복소수로 결정될 수 있으며

$$\bar{\mathbf{h}}\mathbf{w}_{csit} = M \quad (5)$$

를 만족한다. 따라서 식 (4)의 평균 상관지표 μ 는 최대 크기 M 을 갖는다.

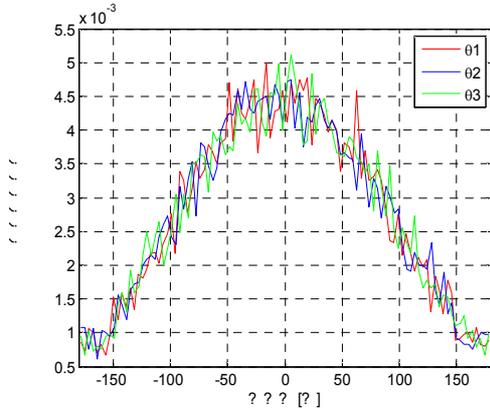
또한 선택된 코드벡터 사용 시 평균 채널 용량 C 는

$$C = E\left[\log_2\left(1 + \frac{E_T}{N_0} \|\mu\|^2\right)\right] \quad (6)$$

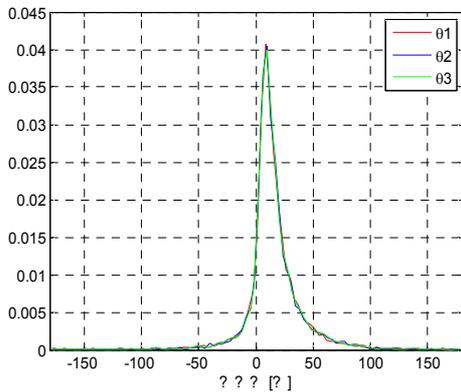
와 같이 정의되며^[11], 이 때 E_T 는 신호의 세기이다. 정규화된 평균 채널 용량은 $\mu = M$ 일 때의 최대값 K 로 나누어 $C_{norm} = C/K$ 가 된다.

2. 채널의 통계적 특성

3D-SCM의 특성을 살펴보기 위해서 인접 채널 간의 위상차를 확인하였다. $M=4$, $N=1$ 일 때, 송신 안테나의 k 번째 원소에서 단말에 도달한 채널 h_k 의 위상을 ϕ_k ($0 \leq k \leq M-1$)이라고 할 때, 인접한 채널간의 위상차는 $\theta_k = \phi_k - \phi_{k-1}$ ($1 \leq k \leq M-1$)이며 θ_k 의 확률밀도함수는 그림 2와 같다. 그림 2에서 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{M-1}$ 의 확률분포함수가 동일한 모양을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 인접 채널 간 위상차가 일치하는 정도를 확인하기 위해 변수 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{M-1}$ 가 갖는 특정 값들의 표준편차를 계산할 수 있다. 위상값들의 벡터 평균값을



(a)



(b)

그림 2. 인접 안테나 채널 간 위상차의 확률밀도함수.
(a) 세로 안테나 원소, (b) 가로 안테나 원소

Fig. 2. PDF of the phase difference between adjacent antenna channels. (a) horizontal antenna elements, (b) vertical antenna elements.

$$m = \angle (e^{j\theta_1} + e^{j\theta_2} + \dots + e^{j\theta_{M-1}}) \quad (7)$$

으로 결정하고, 이때 표준편차는

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{M-2} (e^{j\theta_i} - m)^2}{M-1}} \quad (8)$$

으로 계산할 수 있다.

그림 3 (a)와 (b)는 각각 가로와 세로 안테나로 형성된 채널의 인접 안테나 채널 간 위상차에 대한 표준편차 확률밀도함수이다. 세로 안테나의 경우 표준편차가 작은 쪽에 많은 채널들이 몰려있는 반면 가로 안테나의 경우에는 그렇지 않았다. 세로와 가로의 표준편차의 평균은 각각 25°, 78° 이었다. 즉, 세로 안테나 원소들의

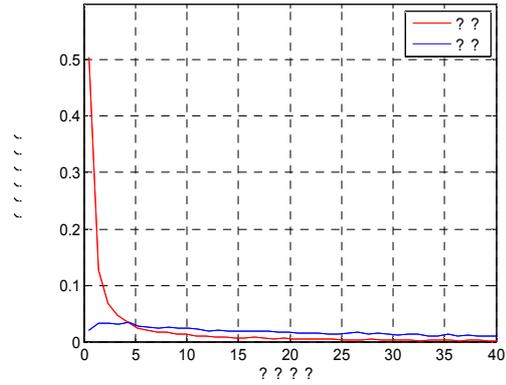


그림 3. 인접 안테나 채널 간 위상차의 표준편차 분포
Fig. 3. Distribution of the standard deviation of the phase difference between adjacent antenna channels.

인접 채널간의 위상차가 가로 안테나의 인접한 안테나 간 위상차보다 일관적이다.

III. 기존 코드북

1. LTE 코드북

기존에 많이 사용되는 코드북 중 하나로 3GPP Release 10 의 LTE 코드북이 있다.^[5] LTE 코드북은 송신 안테나의 개수에 따라 정해져 있는 코드북을 사용하며 Release 10에서는 송신 안테나의 개수가 2, 4, 8개인 경우에 대해 코드북이 존재한다. 2개일 때는 2비트, 4개와 8개일 때는 4비트의 코드북을 갖으며 표 1은 송신 안테나의 개수가 4개일 때의 LTE 코드북으로 고정된 4 비트 크기의 코드북을 갖는다.

표 1. 4TX-LTE 코드북
Table 1. 4TX-LTE codebook.

번호	코드벡터	번호	코드벡터
0	[1 -1 -1 -1]	8	[1 -1 1 1]
1	[1 -j 1 j]	9	[1 -j -1 -j]
2	[1 1 -1 1]	10	[1 1 1 -1]
3	[1 j 1 -j]	11	[1 j -1 j]
4	$[1 \frac{(-1-j)}{\sqrt{2}} -j \frac{(1-j)}{\sqrt{2}}]$	12	[1 -1 -1 1]
5	$[1 \frac{(1-j)}{\sqrt{2}} j \frac{(-1-j)}{\sqrt{2}}]$	13	[1 -1 1 -1]
6	$[1 \frac{(1+j)}{\sqrt{2}} -j \frac{(-1+j)}{\sqrt{2}}]$	14	[1 -1 -1 -1]
7	$[1 \frac{(-1+j)}{\sqrt{2}} j \frac{(1+j)}{\sqrt{2}}]$	15	[1 1 1 1]

2. Vector Quantization 기반 코드북

VQ 기반 코드북은 주어진 채널 정보를 기반으로 코드북을 모델링한 것이다. 본 논문에서 설계한 VQ 기반 코드북은 Lloyd-Max 알고리즘을 사용하여 결정된다.^[9] Lloyd-Max 알고리즘은 NNC (nearest neighbor condition)와 CC (centroid condition) 두 가지 과정의 반복을 통해 주어진 채널에 이상적인 코드북을 찾는다.

먼저 NNC 과정은 식 (9)로 나타낼 수 있으며 초기 코드북들은 임의로 설정된다. 채널은 이 코드북 중 자신에게 가장 적합한 코드북을 선택하며 같은 코드북을 선택한 채널끼리 하나의 그룹을 형성한다. 주어진 L 비트 코드북들 $\{e^{j\theta_i} : i = 1, \dots, 2^L\}$, i 번째 코드북을 선택한 채널 그룹을 S_i , 또한 S_i 의 소속 채널 중 하나를 $\mathbf{P}_i[n]$ 으로 정의하였다.

$$S_i = \left\{ \mathbf{P}_i : \|\mathbf{P}_i[n]e^{j\theta_i}\|^2 \geq \|\mathbf{P}_i[n]e^{j\theta_j}\|^2, i \neq j \right\} \quad (9)$$

두 번째 과정인 CC (centroid condition)는 각각의 그룹에서 가장 알맞은 새로운 코드북을 찾는 과정이다.

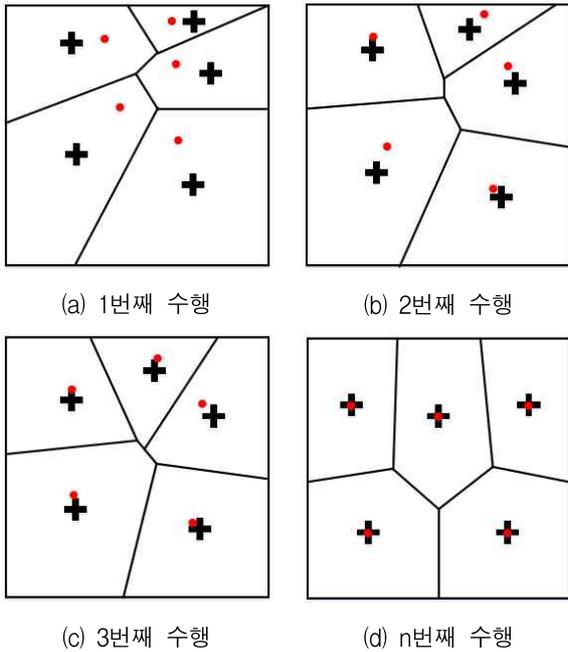


그림 4. Lloyd-Max 알고리즘의 과정.

- (a) 1번째 반복과정, (b) 2번째 반복과정,
(c) 3번째 반복과정, (d) n 번째 반복과정

Fig. 4. The process of the Lloyd-Max algorithm.

- (a) 1st iteration, (b) 2nd iteration,
(c) 3rd iteration, (d) n -th iteration.

이는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며 이 과정을 통해 찾은 코드북들과 이전 코드북들 간의 오차가 설정한 오차범위에 안에 존재할 경우, 마지막 과정의 코드북이 최종 코드북이 된다. 오차보다 작지 않을 경우에는 CC 과정을 통해 생성한 코드북을 통해 NNC 과정을 수행하게 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_i &= \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmax}} E \|\mathbf{P}_i[n]e^{j\mathbf{x}}\| \\ &= \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmax}} ((e^{j\mathbf{x}})^H E \{\mathbf{P}[n]^H \mathbf{P}[n]\} e^{j\mathbf{x}}) \end{aligned} \quad (10)$$

그림 4는 보로노이 다이어그램에서 Lloyd-Max 알고리즘의 반복 과정을 보여주며 점은 현재 지점의 코드북을 의미하며 더하기 표시는 보로노이 셀의 중심으로 CC과정을 통한 코드북 값을 의미한다. NNC와 CC 과정이 여러 번 반복되었을 때 현재 지점의 코드북 값과 CC과정의 코드북 값이 거의 일치하게 되며 최종 코드북을 찾는 과정을 보여준다.

3. 균일위상 DFT 코드북

DFT 코드북은 DFT 행렬의 열 벡터를 코드북으로 갖는다. n 비트 DFT 코드북은 $M \times L$ 크기의 DFT 행렬에서 2^n 개 열 벡터를 코드북으로 선택한다. M 은 송신 안테나의 개수, L 은 임의의 선택 값이 되며 $M \times L$ DFT 행렬은

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{dft} &= [\mathbf{w}_1 \ \mathbf{w}_2 \ \dots \ \mathbf{w}_L] \\ &= \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{L}u_1} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{L}u_1(L-1)} \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{L}u_2} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{L}u_2(L-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{L}u_M} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{L}u_M(L-1)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

와 같이 나타낼 수 있다 ($u_k \in \{0, 1, \dots, L-1\}, u_k \neq u_l, \forall k \neq l$). 코드북은 부호 워드(codeword) 간의 상호 상관 값이 작아지는 방향으로 선택되며 식 (12)와 같다.^[4]

$$\begin{aligned} d_{\min}(\mathbf{C}_{DFT}(\mathbf{u})) &= \sqrt{1 - \max_{1 \leq i < j < L} |\mathbf{w}_i^H \mathbf{w}_j|^2} \\ &= \sqrt{1 - \max_{1 \leq i < j < L} \left| \sum_{m=1}^M e^{j\frac{2\pi}{L}u_m(j-i)} \right|^2} \end{aligned} \quad (12)$$

IV. SCM 환경 특성을 고려한 비균일위상 DFT 코드북

3D-SCM의 통계적 특성 분석을 통해 채널 간의 위상차 확률밀도함수가 균일하지 않고 특정 값에 많이 분포되어 있는 것을 확인하였다. 이와 같은 특징을 통해서 균일위상 DFT 코드북을 사용하는 것보다 분포가 밀집되어 있는 값에 더 많은 양자화 값을 배치시키는 것이 상관지표 측면에서 더 좋은 결과를 기대할 수 있다. 그림 5는 가로 안테나의 인접한 채널 원소간의 위상차 확률밀도함수에서 양자화 레벨 수에 따른 균일위상과 비균일위상 방식에 따라 채널 위상의 양자화 값을 선택하는 예시이다. 그림 5에서 나타난 양자화 된 위상은 각 코드벡터의 위상차를 나타낸다. DFT 코드북의 경우 선택된 n 번째 코드북의 위상차는 $2\pi(u_j - u_{j-1})n/L$, $j \in \{2, \dots, M\}$, $n \in \{0, 1, \dots, L-1\}$ 가 되며 양자화 값 사이에 최소 거리가 일정하면 균일위상 DFT 코드북이 된다. 그림 5에서는 균일위상을 사용하였을 때 양자화 된 값은 간격이 $360^\circ/k$ 로 일정한 값을 갖게

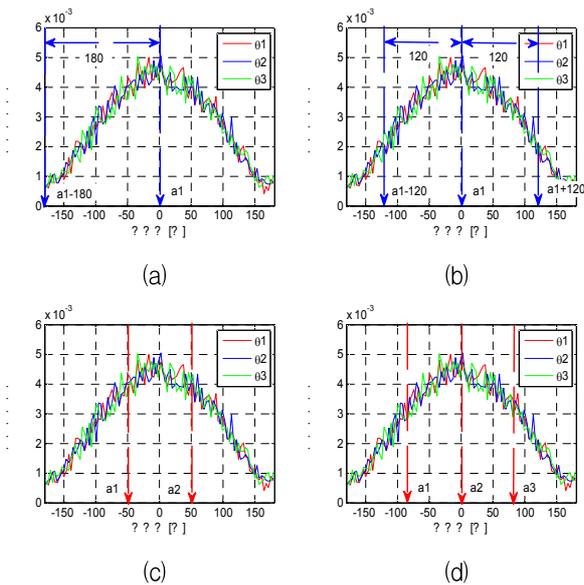


그림 5. 양자화 레벨에 따른 균일위상과 비균일위상 선택. (a) 균일위상 2-level, (b) 균일위상 3-level, (c) 비균일위상 2-level, (d) 비균일위상 3-level

Fig. 5. Selection of uniform and non-uniform phase for a given quantization level. (a) 2-level uniform phase, (b) 3-level uniform phase, (c) 2-level non-uniform phase, (d) 3-level non-uniform phase.

되는 반면 비균일위상 코드벡터는 통계적 분포를 바탕으로 0° 에 밀집한 값들을 설정하여 설계할 수 있다. 예를 들어 $k=2$ 인 경우 비균일 위상 코드벡터의 양자화 위상을 $\pm 40^\circ$ 로 0° 에 대칭적으로 설계할 수 있으며 균일위상 코드벡터보다 채널 용량 측면에서 높은 성능을 보이게 된다. 그림 6은 균일위상 DFT 코드북과

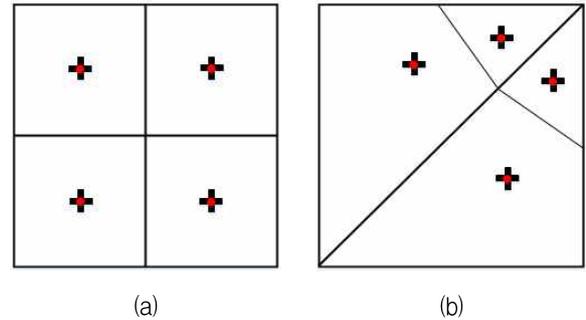


그림 6. 균일위상과 비균일위상 DFT 코드북. (a) 균일위상 코드북, (b) 비균일위상 코드북

Fig. 6. Uniform phase and non-uniform phase DFT codebooks. (a) uniform phase codebook, (b) non-uniform phase codebook.

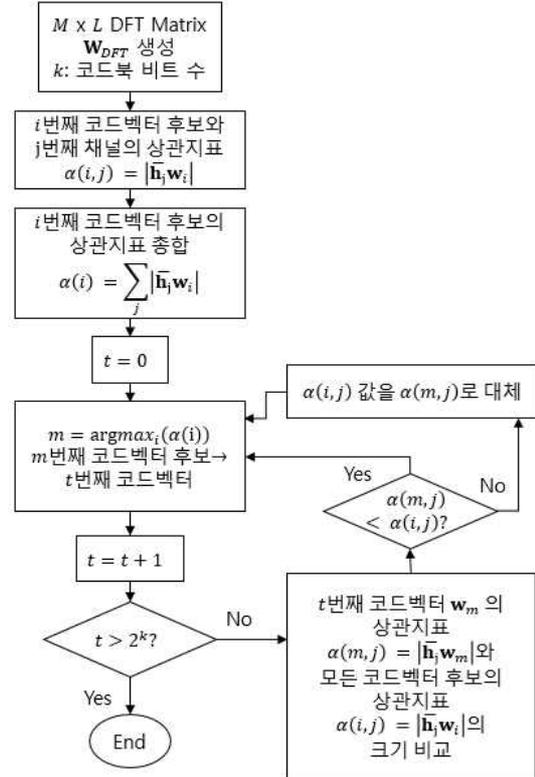


그림 7. 비균일위상 코드벡터 선택 과정
Fig. 7. Selection procedure for non-linear phase codevectors.

비균일위상 DFT 코드북을 보로노이 다이어그램을 통해 비교한 것이다.

3D-SCM 환경을 바탕으로한 비균일위상 DFT 코드북의 생성은 greedy algorithm을 기반으로 하였다. 그림 7은 식(11)의 DFT 행렬에서 n 비트 비균일위상 DFT 코드벡터 ($2^n = k$)개를 선택하는 과정으로 주어진 채널에 대해 가장 좋은 성능을 보이는 코드벡터를 우선적으로 선택하며 이후에는 선택된 코드벡터를 포함하여 좋은 성능을 보이는 코드벡터를 순차적으로 추가하는 과정이다.

V. 성능 평가

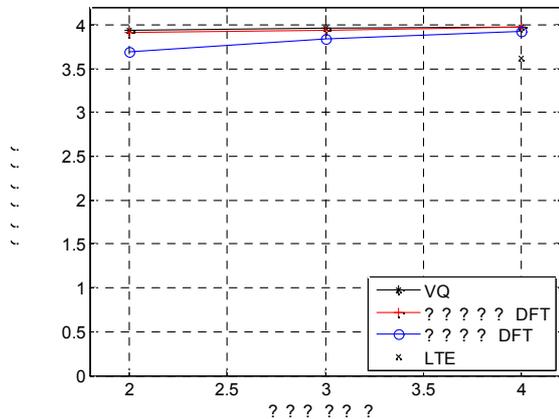
성능 평가에서는 송신 안테나의 개수 $M=4$, 수신 안테나의 개수 $N=1$ 인 3D-SCM 채널 모델에서의 코드북 성능을 비교하였다. 3D-SCM 시나리오는 UMa를 선택하였으며 실험 파라미터는 표 2과 같다. 생성된 채널을 바탕으로 코드북의 비트 수에 따른 상관지표의 결과를 비교한 결과는 그림 8과 같다. 평균 상관 지표 값은 채널 추정이 완벽히 이루어졌을 때 최대값을 가지며 식 (5)에 따라 최대 $M=4$ 가 된다. 균일위상 DFT 코드북의 경우에는 비트 수에 맞는 크기를 갖는 DFT 행렬을 생성하였으며 비균일위상 DFT 코드북의 경우에는 $L=64$ 인 DFT 행렬에서 greedy algorithm을 이용하여 코드벡터를 선택하여 실험을 실시하였다. 전체적인 결과를 살펴보면 세로 안테나의 경우 가로 안테나의

경우보다 평균 상관지표가 높은 것을 확인하였다. 즉, 가로보다 세로 안테나의 경우, 인접 안테나 간 위상차가 일정한 것을 알 수 있으며 이는 앞에서 위상차 표준편차의 확률밀도함수를 통해서도 확인할 수 있다. 그림 9는 각각 세로와 가로 안테나 구조에서 비트 수가 2인 코드북에 대한 정규화된 평균 채널 용량 값이다. 비균일위상 DFT 코드북을 사용하였을 때, 최적 VQ 코드북에 매우 근접하는 성능을 보임을 확인할 수 있었으며 기존 균일위상 DFT 코드북보다 향상된 채널 용량 크기를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 비균일위상 DFT 코드북이 주어진 채널에서 균일위상 DFT 코드북보다 우수한 성능을 보임을 검증할 수 있다.

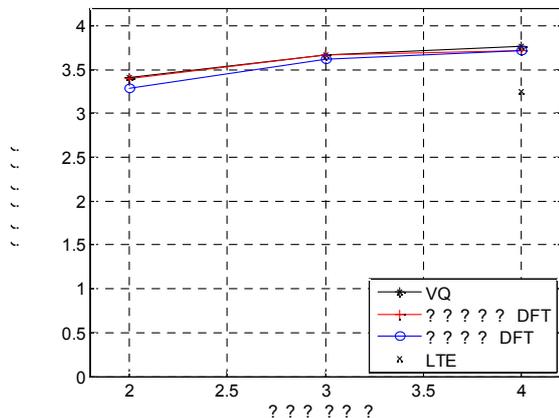
표 2. 실험 파라미터

Table 2. Simulation parameters.

파라미터	값
셀 구조	19셀 3섹터
기지국 간 거리	500 m
사용자 분포	10,000 명의 사용자
경로 감쇄	TR36.873 3D-UMa
중심주파수	2GHz
안테나 수	기지국: 4
	사용자: 1
인접 안테나간 거리	0.5λ
기지국의 높이	25 m
사용자의 실내 분포 비율	80%

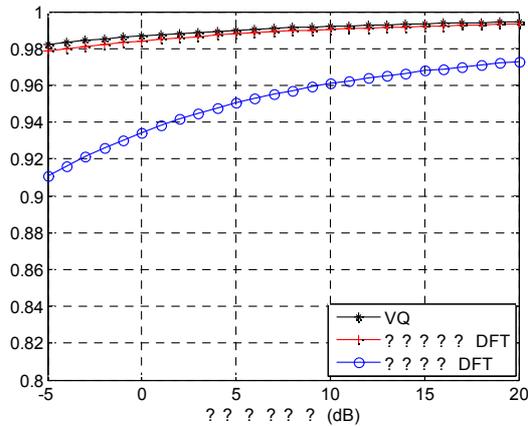


(a) 세로 안테나

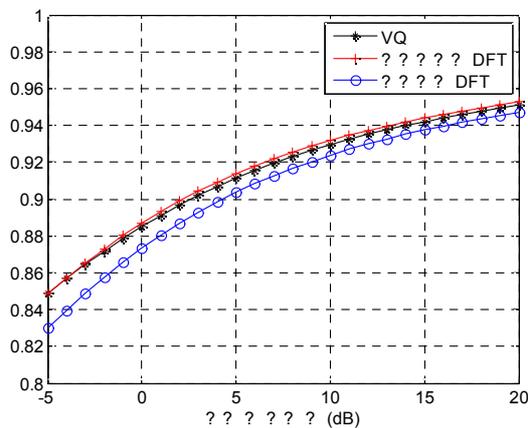


(b) 가로 안테나

그림 8. 코드북 종류에 따른 평균 상관 지표
Fig. 8. Average correlation measure of different codebooks.



(a) 세로 안테나



(b) 가로 안테나

그림 9. 정규화된 평균 캐패시티 (M =4, 비트 수 n=2)
Fig. 9. Normalized average capacities.
(M=4, number of bit n=2).

VI. 결 론

3D-SCM 시스템에서 인접 채널 간 안테나의 상관도와 특징을 확인하였으며 채널 위상차에 대한 통계적 분석을 통해서 세로 안테나의 인접한 채널 간 위상차가 가로의 경우보다 높은 상관도를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 또한 위상차 확률밀도함수 분석을 통해서 기존 DFT 코드북과 LTE 코드북보다 좋은 성능을 갖는 비균일위상 DFT 코드북을 결정하여 사용할 수 있으며 성능 평가를 통해 그 우수성을 확인하였다. 세로 안테나의 경우, 신호대 잡음 비가 -5dB일 때, 비균일위상 DFT 코드북의 평균 채널 용량이 균일위상 DFT보다 7.7% 증가하였다.

REFERENCES

- [1] J. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. Soong, and J. Zhang, "What will 5G be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, June 2014.
- [2] 3GPP, TR 36.814, "Further Advancements for E-UTRA:Physical Layer Aspects".
- [3] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE-The UMTS Long Term Evolution: From theory to practice*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2011.
- [4] B. M. Hochwald, T. Marzetta, T. Richardson, W. Sweldens, and R. Urbanke, "Systematic design of unitary space-time constellations," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, pp. 1962-1973, Sept. 2000.
- [5] L. Wan, X. Zhong, Y. Zheng, and S. Mei, "Adaptive codebook for limited feedback MIMO system," in *Proc. 2015 Int. Conf. Wireless and Optical Commun. Networks, WOCN 2009*, Cairo, April 28-30, 2009.
- [6] J. Park, J. Kim, H. Yoo, and W. Sung, "Construction of phase tracking codebooks based on the Lloyd-Max vector quantization," in *Proc. Wireless Commun. and Networking Conf., WCNC 2011*, Cancun, Mar. 28-31, 2011.
- [7] 3GPP, TS. 26.211 v10.7.0, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 10)".
- [8] 3GPP R1-062483, "Comparison between MU-MIMO codebook-based channel reporting techniques for LTE downlink," 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #46bis, Oct. 2006.
- [9] 3GPP, TR. 36.873 v1.2.0, "Study on 3D channel model for LTE (Release 12)".
- [10] 3GPP, TR. 25.996 v11.0.0, "Spatial channel model for Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) simulations (Release 11)".
- [11] Y .T. Wu, Y. Y. Zhao, and F. Yu, "Comparison of codebooks for beamforming in limited feedback MIMO systems," in *Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, Zhangjiajie, May 25-27, 2012.

— 저 자 소 개 —



서 준 엽(학생회원)
2014년 서강대학교
전자공학과 학사 졸업.
2014년~현재 서강대학교
전자공학과 석사과정

<주관심분야 : 빔포밍, MU-MIMO, 5G>



강 호 식(학생회원)
2013년 서강대학교
전자공학과 학사 졸업.
2015년 서강대학교
전자공학과 석사 졸업.

<주관심분야 : 이동무선통신, MIMO, Cognitive Radio>



성 원 진(평생회원)
1990년 서울대학교
전자공학과 학사
1992년 University of Michigan
EECS 석사
1995년 University of Michigan
EECS 박사

1996년 1월~2000년 8월 Hughes Network
Systems社 책임연구원

2000년 9월~현재 서강대학교 전자공학과 교수

<주관심분야 : 이동무선통신, MIMO>