

일반논문 (Regular Paper)

방송공학회논문지 제24권 제4호, 2019년 7월 (JBE Vol. 24, No. 4, July 2019)

<https://doi.org/10.5909/JBE.2019.24.4.613>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

보행자 채널의 페루프 MISO 시스템에서 적응형 단일계층 차분 코드북 설계

김 영 주^{a)†}

A Single-layer Differential Codebook Design Over Pedestrian Closed-loop MISO System

Young-Ju Kim^{a)†}

요 약

코드북을 이용하는 페루프 MISO 시스템에서 시간 상관성을 이용한 차분 코드북 설계 방법을 제안한다. 단일계층 코드북의 코드워드 인자들은 위상 성운의 집합 중에서 선택된다. 기존의 코드워드 선택 식에서는 코드워드들을 구면의 캡들이라 가정하고 서로의 각도를 사인 법칙을 이용하여 구하였으나, 본 논문에서는 피타고라스 법칙을 이용하는 새로운 방법을 이용하여 계산식을 간소화 시키는 식을 제안한다. 그리고 선택되는 코드워드간의 상관 계수 즉, 위상차의 변화를 추적하여 2 개의 코드북 중에 최적의 코드북을 적응적으로 선택하는 방법을 제안한다. Monte-Carlo 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 코드북의 성능을 검증한다.

Abstract

A differential codebook design method using wireless channel's temporal correlation is proposed over closed loop multiple-input single-output (MISO) system. The single layer codewords in a codebook are selected among a set of phase elements. In the conventional codeword selection rule, codewords are assumed to be on a spherical cap and sine formula was used. In this paper, however, a new method using Pythagoras formula is employed to simplify computational complexity. Also, an adaptive differential codebook selection is adopted to enhance performance. Monte-Carlo simulations demonstrate that the proposed codebook is superior to the conventional ones.

Keyword : MISO, codebook, mobile communication, temporal correlation

a) 충북대학교 전자정보대학 정보통신공학부(College of Electrical and Computer Eng., School of Information and Communication Engineering, Chungbuk University)

† Corresponding Author : 김영주 (Young-Ju Kim)
E-mail: yjkim@cbnu.ac.kr
Tel: +82-43-261-3375
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5844-8612>

· Manuscript received January 23, 2019; Revised May 13, 2019; Accepted June 13, 2019.

1. 서론

다중 송수신 안테나(multiple-input multiple-output, MIMO)를 이용한 기술은 지난 20년여 동안 폭넓게 연구되어 왔고, 이미 4세대 및 5세대 이동통신 시스템에 적용되고 있다. MIMO 기술은 무선 통신의 성능과 신뢰를 향상시키는데 효과적이라고 인식되고 있다^[1]. 나아가 송수신부에 수십 개 이상의 안테나를 사용하여 대용량의 데이터를 고속으로 전송할 수 있는 거대 송수신 안테나 (massive MIMO) 시스템을 이용한 이동통신 기술도 활발하게 연구되고 있다^[2]. 거대 송수신 안테나 시스템은 각 기지국에서 매우 큰 안테나 이득을 얻을 수 있으며^[3], 채널 상태 정보(channel state information, CSI)의 피드백에 따라 개루프(open-loop) MIMO와 폐루프(closed-loop) MIMO로 분류할 수 있다. 폐루프 MIMO 시스템은 수신부로부터 CSI를 피드백 받을 수 있을 때, 다이버시티 및 빔포밍 이득을 얻을 수 있다^[4]. 본 논문은 송신 안테나가 각각 4개 이하인 경우의 MISO 폐루프 시스템에 적합한 단일 계층 차분 코드북 설계에 대해 다룬다. 폐루프 시스템의 핵심은 송신부가 CSI를 알고 있어야 한다는 것이다. 채널 상태 정보는 피드백 채널을 통해 송신부로 전송되는데, 피드백 채널의 용량 제한 때문에 피드백 정보는 양자화 되어야한다^[5]. 제한된 피드백 시스템에서의 통신은 채널 공간의 양자화 왜곡을 최소화할 수 있는 코드북을 설계하는데 초점을 맞추고 있다^[6]. 수신부는 해당 조건을 만족하는 최적의 코드워드 인덱스(codeword index)만을 피드백 비트 형태로 송신부로 보낸다. 본 논문은 시속 1킬로에서 3킬로의 느리게 변하는 채널

즉, 시간 상관성이 높은 무선 채널에 적합한 차분 코드북을 설계한다. 시간 상관 채널 모델은 이전 채널에 의존적이며 실제 채널에 근사한 형태를 보이는 모델이다. 특히 차분 코드북을 설계할 때 코사인 법칙을 적용하는 방법을 제안한다.

본 논문에서 사용되는 수식 기호들은 다음과 같다. 영문 대문자 볼드체 \mathbf{A} 는 행렬, $a_{i,j}$ 는 행렬 \mathbf{A} 의 i,j 번째 원소, 영문 소문자 볼드체 \mathbf{a} 는 벡터, \mathbf{A}^T 는 행렬 \mathbf{A} 의 전치(transpose) 행렬, \mathbf{A}^* 는 행렬 \mathbf{A} 의 공액(conjugate) 행렬, \mathbf{A}^H 는 행렬 \mathbf{A} 의 공액 전치(conjugate transpose) 행렬 그리고 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ 은 복소 행렬 \mathbf{A} 가 m 개의 행과 n 개의 열로 구성되어 있음을 의미한다. 또한, $|\cdot|$ 는 스칼라의 절대값 그리고 $\|\cdot\|$ 는 벡터의 2-norm을 나타낸다.

2. 시스템 모델

폐루프 MIMO 시스템에서 송신 안테나 수를 M_t , 수신 안테나 수를 M_r 그리고 공간 스트림 수 M_s 로 정의한다. 여기서 시스템 모델을 단순화하기 위해 M_t 및 M_s 를 1로 정의하였다. 그림 1은 다중 송수신 안테나 시스템의 블록도이다. 수신부에서 송신부로 B 비트의 코드북 내 코드워드를 피드백 한다면, 송수신부는 $N=2^B$ 크기의 동일한 코드북을 서로 공유한다. 시간 스텝(time step) k 에서의 코드북은 $\mathbf{W}_k = \{\mathbf{w}_{k,1}, \dots, \mathbf{w}_{k,N}\}$ 로 정의되며, 매 시간 스텝마다 차분 코드북이 생성된다. 이 때, $\mathbf{w}_{k,n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, $n = 1, \dots, N$ 은 CSI를 이용한 n 번째 코드워드, $\mathbb{C}^{a \times b}$ 는 $a \times b$ 복소수 행

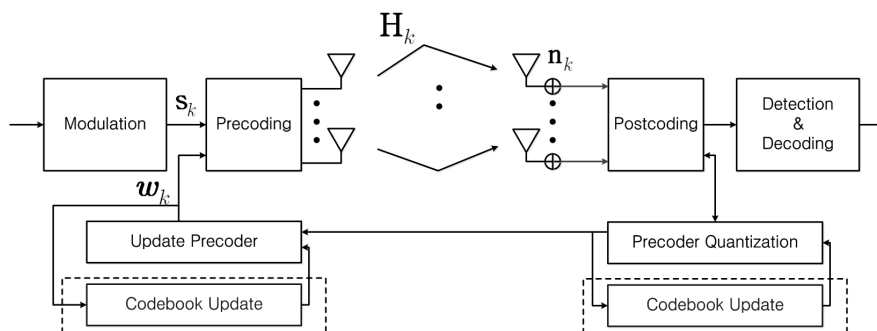


그림 1. 폐루프 다중 송수신 안테나의 시스템 블록도
Fig. 1. Block diagram of closed-loop multiple-input multiple-output system

렬을 나타낸다.

시간 상관 채널에서 수신부는 코드북의 코드워드 중에서 채널 용량을 최대화하는 n_{opt} 번째 코드워드를 선택, B 비트로 구성된 인덱스 n_{opt} 만을 송신부로 피드백하는 과정을 거친다. 송신부는 수신된 인덱스 n_{opt} 를 이용하여 코드북 \mathbf{w}_k 중에서 $\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_{k, n_{opt}}$ 인 코드워드를 선택한다. 이 때, 수신 신호 \mathbf{y}_k 는 다음 수식 (1)과 같이 표현된다^{[5][6][7]}.

$$\mathbf{y}_k = \sqrt{\frac{\rho}{M}} \mathbf{H}_k \mathbf{w}_k s_k + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

이 때 $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{M_r \times M_t}$ 은 시간 스텝 k 에서 평균이 0, 분산이 1인 서로 독립이며 균일한 분포 (independent and identically distributed) 를 갖는 비상관성 레일리 플랫폼 페이딩 채널이고, $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{M_r \times 1}$ 는 평균은 0, 분산은 1인 서로 독립이며 균일한 분포를 갖는 가산성 백색 가우시안 잡음 (AWGN) 그리고 ρ 는 SNR 을 나타낸다. 한편, 시간 상관성 채널은 1 차 가우스-마르코프 체인 모델을 가정하며 이는 다음의 수식으로 표현 가능하다^{[5][6][7]}.

$$\mathbf{H}_k = \epsilon \mathbf{H}_{k-1} + \sqrt{1 - \epsilon^2} \mathbf{G}_k \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{G}_k \in \mathbb{C}^{M_r \times M_t}$ 은 평균이 0, 분산이 1인 서로 독립이며 균일한 분포를 갖는 비상관성 레일리 플랫폼 페이딩 채널이다. 잡음 성분 \mathbf{n}_k 는 \mathbf{G}_k 와 \mathbf{H}_0 에 독립이며, 초기 상태 \mathbf{H}_0 또한 모든 시간 스텝 k 에 대해 \mathbf{G}_{k+1} 와 독립인 것으로 가정한다. ϵ ($0 \leq \epsilon \leq 1$) 는 채널 상관 계수로서 인접한 채널 정보 \mathbf{H}_{k-1} 와 \mathbf{H}_k 간의 상관성을 나타내는데, \mathbf{H}_k 의 모든 인자는 동일한 채널 상관 계수 ϵ 값을 갖는다고 가정한다.

III. 기존의 차분 코드북

차분 코드북은 $\mathbf{W}_{diff} = \{\mathbf{w}_{diff,1} \cdots \mathbf{w}_{diff,N}\}$ 으로 표현된다^{[7][8]} 기서 $\mathbf{w}_{diff,n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, $n = 1, \dots, N$ 은 차분 코드북의 n 번째 코드워드이며 8개의 인자를 가지는 위상 쉬프트 키잉

(8-PSK) 성운을 인자로 갖는다. 송·수신부는 식 (3)을 이용하여 이전에 선부호화된 벡터 $\mathbf{w}_{k-1, n_{opt}}$ 와 차분 코드북 \mathbf{w}_{diff} 을 이용하여 매 시간 스텝 k 에서 새로운 코드북 \mathbf{w}_k 가 계속 업데이트된다^[7].

$$\mathbf{w}_{k,n} = \langle \mathbf{w}_{diff,n} \cdot \mathbf{w}_{k-1, n_{opt}} \rangle \quad (3)$$

이때 연산자 $\langle \cdot \rangle$ 는 $\mathbf{w}_{k-1, n_{opt}}$ 와 \mathbf{w}_{diff} 의 n 번째 코드워드 $\mathbf{w}_{diff,n}$ 의 인자 간 곱이며 이를 통해 \mathbf{w}_k 의 n 번째 코드워드인 $\mathbf{w}_{k,n}$ 을 얻을 수 있다. n 은 코드북 인덱스 이며, n_{opt} 는 최적의 벡터로 선택된 인덱스 값이다. 각 시간 스텝에서 코드북 내의 코드워드들은 연속적으로 변경된다. $k = 1$ 에서는 이전 시간 스텝에서의 최적의 코드워드가 존재하지 않기 때문에 차분 코드북이 아닌 LTE 코드북과 같은 기존의 코드북을 이용하며 시간 스텝 $k \geq 2$ 부터 8-PSK 성운을 가지는 1번 코드북을 적용할 수 있다.

1번 코드북은 식 (3)을 통해 송신부와 수신부에서 동시에 업데이트되며, 수신부에서는 하향링크 채널 행렬인 \mathbf{H}_k 를 추정하고 이를 이용하여 현재 시간 스텝의 코드북 \mathbf{w}_k 에서 최적의 코드워드 $\mathbf{w}_{k, n_{opt}}$ 를 선택한다. 최적의 인덱스 n_{opt} 는 채널 용량을 최대로 하는 값을 선택한다. 이는 식 (4)와 같다.

$$n_{opt} = \arg \max_{1 \leq n \leq N} \log_2(1 + \rho \|\mathbf{H}_k^H \mathbf{w}_{k,n}\|_2^2) \quad (4)$$

1번 코드북 (또는 코드북 1번이라 칭함)은 코드워드 인자로 8-PSK 성운 중 $e^{-\pi/4}$, 1 , $e^{\pi/4}$ 만을 사용한다. 시간 스텝 k 에서의 코드북은 식 (3)의 과정을 거쳐 업데이트되며, 코드워드 $\mathbf{w}_{diff,1} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ 을 중심으로 차분 코드북 \mathbf{w}_{diff} 를 설계한다. $\mathbf{w}_{diff,1}$ 은 이미 결정되었고, 나머지 코드워드는 코드북의 회전 불변성 (rotation invariance) 특성에 의해 $(N-1) \times (M_t - 1) = 45$ 개가 생성되는데, 주어진 시간 상관 계수 ϵ 에서 채널 용량을 최대화하는 집합을 선택하게 된다. 즉, 차분 코드북의 설계는 \mathbf{w}_k 의 각 코드워드의 3개 인자의 자리에 매핑 가능한 모든 경우를

산출하고, 그 중에서 최적의 15개 코드워드를 선택하는 것이다. 이 과정으로 구한 코드북은 단일계층 코드북 1번이다. 단일계층 코드북 1번은 비교적 고속에서 적용했을 때 우수한 성능을 얻을 수 있다. 한편, 동일한 방법으로 성운의 수를 32-PSK로 늘려서 단일계층 코드북 2번을 설계할 수 있다. 코드북 2번은 느린 페이딩 채널에서 코드북 1번 보다 우수한 성능을 보인다.

IV. 제안하는 차분 코드북

기존의 차분 코드북은 고정된 구면 캡 반경을 가지지 않을 뿐만 아니라, 시간 상관의 정도에 따라 적응적으로 코드

표 1. 차분 코드북
Table 1. Differential codebook

Index	Codebook 1	Codebook 2
1	$[1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$	$[1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$
2	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{4}} \ 1 \ 1]^T$	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{16}} \ e^{j\frac{\pi}{16}} \ 1]^T$
3	$[1 \ 1 \ e^{j\frac{\pi}{4}} \ 1]^T$	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{16}} \ e^{-j\frac{\pi}{16}} \ 1]^T$
4	$[1 \ 1 \ 1 \ e^{j\frac{\pi}{4}}]^T$	$[1 \ 1 \ e^{-j\frac{\pi}{8}} \ e^{j\frac{\pi}{16}}]^T$
5	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{4}} \ 1 \ 1]^T$	$[1 \ 1 \ e^{-j\frac{\pi}{16}} \ e^{-j\frac{\pi}{8}}]^T$
6	$[1 \ 1 \ e^{-j\frac{\pi}{4}} \ 1]^T$	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{16}} \ 1 \ e^{-j\frac{\pi}{8}}]^T$
7	$[1 \ 1 \ 1 \ e^{-j\frac{\pi}{4}}]^T$	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{8}} \ 1 \ e^{j\frac{\pi}{16}}]^T$
8	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{4}} \ 1 \ e^{j\frac{\pi}{4}}]^T$	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{8}} \ 1 \ e^{-j\frac{\pi}{8}}]^T$
9	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{4}} \ e^{j\frac{\pi}{4}} \ 1]^T$	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{16}} \ e^{j\frac{\pi}{8}} \ e^{j\frac{\pi}{16}}]^T$
10	$[1 \ 1 \ e^{j\frac{\pi}{4}} \ e^{j\frac{\pi}{4}}]^T$	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{16}} \ e^{-j\frac{\pi}{16}} \ e^{j\frac{\pi}{8}}]^T$
11	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{4}} \ 1 \ e^{j\frac{\pi}{4}}]^T$	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{8}} \ e^{j\frac{\pi}{16}} \ e^{j\frac{\pi}{8}}]^T$
12	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{4}} \ e^{j\frac{\pi}{4}} \ e^{j\frac{\pi}{4}}]^T$	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{8}} \ e^{j\frac{\pi}{8}} \ e^{j\frac{\pi}{16}}]^T$
13	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{4}} \ e^{-j\frac{\pi}{4}} \ 1]^T$	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{16}} \ e^{j\frac{\pi}{8}} \ e^{j\frac{\pi}{8}}]^T$
14	$[1 \ 1 \ e^{-j\frac{\pi}{4}} \ e^{-j\frac{\pi}{4}}]^T$	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{8}} \ e^{j\frac{\pi}{16}} \ e^{-j\frac{\pi}{8}}]^T$
15	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{4}} \ 1 \ e^{-j\frac{\pi}{4}}]^T$	$[1 \ e^{j\frac{\pi}{8}} \ e^{-j\frac{\pi}{8}} \ e^{j\frac{\pi}{8}}]^T$
16	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{4}} \ e^{-j\frac{\pi}{4}} \ e^{-j\frac{\pi}{4}}]^T$	$[1 \ e^{-j\frac{\pi}{8}} \ e^{-j\frac{\pi}{8}} \ e^{-j\frac{\pi}{8}}]^T$

북을 전환하지 않는다. 시스템의 성능을 향상시키기 위하여, 각 시간 스텝의 표 1과 같은 두 개의 후보 코드북 중에서 가장 적합한 코드북을 적응적으로 선택한다. 앞서 설명했듯이 적응형 기법은 각 시간 스텝에서 더 좋은 성능을 얻을 수 있는 차분 코드북을 선택하는 기법이다. 해당 기법을 보다 간단하게 구현할 수 있는 방법은 각 시간 스텝마다 코드북 1번과 코드북 2번을 적용한 성능을 측정하고 둘 중 좋은 성능을 갖는 차분 코드북을 선택하는 것이다. 그러나 이 방법은 2가지 차분 코드북에 대한 성능을 측정해야 하므로 연산 시간이 최소 2배 이상이 되어버리고 이에 따라 효율성이 많이 떨어진다. 따라서, 본 장에서는 구면 캡에서 코드북과 코드북의 위상을 이용하여 코드워드 인자 간 위상차를 계산하고 이를 토대로 코드북 1번과 코드북 2번 중 보다 적합한 차분 코드북을 선택할 수 있는 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 과정은 다음과 같이 4개 스텝으로 이루어진다.

적응형 단일계층 차분 코드북 선택 알고리즘:

- Step 1. 시간 스텝 k 에서의 구면 캡 반경 추정
- Step 2. 코드북 및 코드워드 반경에 대한 위상 계산
- Step 3. 코드워드의 성운 간 위상차 계산
- Step 4. 코드워드 성운 간 위상차에 따른 코드북 선택

코드워드의 인자 수가 송신 안테나 개수인 4개로 설계를 하였다. 제안하는 적응형 코드북의 선택 조건을 간단히 하기 위해 2차원의 인자가 두 개인 복소지수형 $e^{j\theta_k}$ 로 표현한다. 그리고 이를 직교좌표형으로 표현하면 $x + jy$ 의 형태가 된다. 즉, $z = re^{j\theta} = x + jy$ 의 형태인 것이다. 이때 $x = \cos(\theta_k)$ 그리고 $y = \sin(\theta_k)$ 이다. $re^{j\theta} = r^{j\theta_k}$ 이므로 $e^{j\theta_k}$ 는 반지름이 1이고 θ_k 의 위상을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 4.3과 같이 나타낼 수 있다. 이때 반지름 r 에서 내린 수선의 발이 x 가 된다. θ_k 를 그림 4.3에서와 같이 끼인 각이라 할 때, θ_k 에 인접한 한 변은 길이가 1인 r 이 되고 나머지 한 변은 항상 1보다 같거나 작은 $\Delta\theta_k$ 값이 고 작은 값이라고 가정하여, $x = M_t \cos^2(\Delta\theta_k) - (M_t - 1)$ 로 둔다. 이때, $\Delta\theta_k$ 는 첫 번째 코드워드와의 각도로 $\sin(\Delta\theta_k) = \sqrt{1 - 1/M_t |\mathbf{w}_{k,1} \cdot \mathbf{w}_{k,n}|}$ 와 같이 정의된다. $\cos^2(\Delta\theta_k)$ 는 최대값이 1이기 때문에

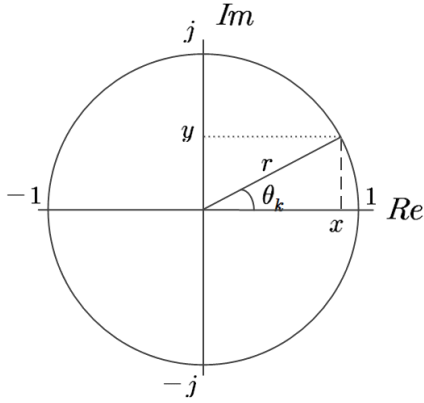


그림 2. $e^{j\theta_k}$ 의 도면화
 Fig. 2. Schematic figure of $e^{j\theta_k}$

M_t 가 어떤 값을 가지게 되어도 x 는 무조건 r 보다 같거나 작은 값을 가지게 된다. 이때 θ_k 와 r 그리고 x 로 구성된 도형은 직각 삼각형으로 가정한다. r 과 x 라는 2개의 변의 길이를 알고 있으므로 피타고라스의 정리인 $x^2 + y^2 = r^2$ 을 이용하면 y 의 값을 구할 수 있다. 피타고라스의 정리를 y 에 관하여 정리 하고 r 과 x 에 기존 연구의 값들을 대입한다. 기존 연구에서는 $r_k = \sin(\theta_k)$ 로 수식을 전개했으나, 본 논문에서는 $r_k = \cos(\theta_k)$ 으로 수식을 전개한다.

$$y = \sqrt{1 - (M_t \cos^2(\Delta\theta_k) - (M_t - 1))^2} \quad (5)$$

그림 2의 도형은 r , x 그리고 y 를 세 변으로 가진 직각 삼각형이므로 다음의 삼각 함수 공식을 적용할 수 있다.

$$\theta_k = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (6)$$

앞서 구했던 x 와 y 의 값을 대입하면

$$\theta_k = \left| \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - (M_t \cos^2(\Delta\theta_k) - (M_t - 1))^2}}{M_t \cos^2(\Delta\theta_k) - (M_t - 1)}\right) \right| \quad (7)$$

다음과 같은 수식을 얻을 수 있다. 식 (7)은 시간 스텝 $k = 2$ 을 제외한 모든 시간 스텝의 구간에서 동일한 θ_k 의

값을 얻을 수 있다. 식 (7)에서는 식 (6)와 달리 절대값인 $|\cdot|$ 표기가 되어있는데, 이는 시간 스텝 $k = 2$ 에서의 식 (6)의 θ_k 의 값이 음수가 되기 때문이다. 본 논문에서는 코드워드 성운 간의 위상차가 쓰이므로 결과가 양수이거나 음수이건 상관없이 절대치만 사용한다.

V. 컴퓨터 시뮬레이션

Monte-Carlo 시뮬레이션은 제안하는 적응형 기법의 용량 성능을 설명하고, 느리게 변하는 채널에서 LTE 코드북의^[8] 성능을 비교하기 위해 실시되었다. 송신 안테나 수 M_t 는 4, 수신 안테나 수 M_r 은 1인 안테나 시스템을 가정한다. 시뮬레이션은 100만 회 이상 반복 실시하였으며 파라미터는 표 2와 같다. 제안하는 기법의 동작을 보장하기 위하여 시간 상관 채널의 변화는 1차 가우스-마르코프 체인 프로세스로 모델링하였다. 채널 상관 계수 ϵ 은 $\epsilon = J_0(2\pi f_D T)$ 로 Jakes 모델을 따른다. 이때, $J_0(\cdot)$ 는 0차 베셀 함수, T 는 시간 스텝 주기 그리고 $f_D = v f_c / c$ 는 단말기 속도 v , 반송 주파수 f_c 그리고 $c = 3 \times 10^8$ m/s로 계산되는 최대 도플러 주파수이다. 피드백 간격은 5 ms, 반송 주파수는 2.5 GHz 그리고 UE의 속도는 1 km/h, 2 km/h 그리고 3 km/h로 가정한다. 시간 스텝 $k = 1$ 에서는 LTE 코드북의 코드워드를 선택한다. 피드백 채널은 오차가 없는 것으로 가정하고, 채널 추정 및 동기화는 완벽하며 공간 상관은 없고 송-수신 안테나 간에 피드백 지연이 없다고 가정한다. 동작 SNR을 10 dB로 고정하였을 때, x 축은 시간 스텝을 나타내며 y 축은 각 시간 스텝에서의 평균 채널 용량을 나타낸다. 시뮬레이션은 제안하는 적응형 기법, 2번 코드북 (32-PSK 코드북), 1번 코드북 (8-PSK 코드북) 그리고 LTE 코드북의 성능을 나타낸다.

그림 3은 제안하는 수식을 적용했을 때, 사용자 단말 이동속도 1 km/h ($\epsilon=0.999$)에서의 성능을 나타낸다. 초기 시간 스텝 범위에서는 1번 코드북의 성능이 2번 코드북보다 약 0.04 (bits/sec/Hz) 뛰어나지만 시간 스텝 $k = 5$ 부터는 2번 코드북이 1번 코드북보다 약 0.037 (bits/sec/Hz) 높은 성능을 보인다. 기존의 수식을 적용한 적응형 기법은 시간

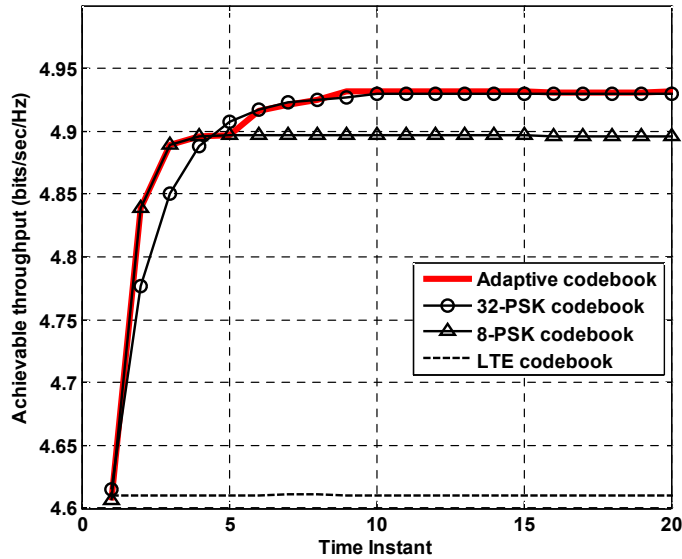


그림 3. 이동속도가 1 km/h ($\epsilon=0.999$)일 때 제안하는 기법의 성능
 Fig. 3. Achievable throughput when the velocity is 1km/h

스텝 $k=5$ 를 제외한 모든 시간 스텝에서 기존 차분 코드북보다 뛰어난 성능을 보인다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터
 Table 2. Simulation parameters

Parameters	Value
Velocity of UE	1 km/h, 2 km/h, 3 km/h
Temporal correlation index (ϵ)	0.999, 0.994, 0.988
Feedback period	5 ms
Carrier frequency (f_c)	2.5 GHz
Number of transmit antenna (M_t)	4
Number of receive antenna (M_r)	1
Number of codewords in the codebook (N)	16
Signal-to-noise ratio	10

수식에 따른 차분 코드북 선택의 차이는 표 3을 보면 보다 정확히 알 수 있다. 표 5.2는 단말 이동속도 1 km/h ($\epsilon=0.999$)에서 적용한 수식에 따른 θ_k 의 위상 및 선택하게 되는 차분 코드북을 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 시간 스텝

표 3. 이동속도 1 km/h에서 차분 코드북 선택
 Table 3. Codebook selection when the velocity is 1km/h

Time step	Conventional θ_k [8]	Selected codebook	Proposed d_{θ_k}	Selected codebook
1	180	Codebook 1	180	Codebook 1
2	99.6329	Codebook 1	90.0383	Codebook 1
3	65.2314	Codebook 1	57.4881	Codebook 1
4	43.3210	Codebook 1	37.8018	Codebook 1
5	28.9171	Codebook 1	25.1267	Codebook 1
6	19.8141	Codebook 2	17.1864	Codebook 2
7	14.4389	Codebook 2	12.5148	Codebook 2
8	11.5573	Codebook 2	10.0142	Codebook 2
9	10.1729	Codebook 2	8.8136	Codebook 2
10	9.5653	Codebook 2	8.2868	Codebook 2
11	9.3130	Codebook 2	8.0681	Codebook 2
12	9.2111	Codebook 2	7.9797	Codebook 2
13	9.1704	Codebook 2	7.9444	Codebook 2
14	9.1542	Codebook 2	7.9304	Codebook 2
15	9.1478	Codebook 2	7.9248	Codebook 2
16	9.1452	Codebook 2	7.9226	Codebook 2
17	9.1442	Codebook 2	7.9218	Codebook 2
18	9.1438	Codebook 2	7.9214	Codebook 2
19	9.1437	Codebook 2	7.9213	Codebook 2
20	9.1436	Codebook 2	7.9212	Codebook 2

템 $k = 5$ 에서는 2번 코드북보다 1번 코드북의 성능이 더 뛰어나지만 기존의 수식 및 제안하는 수식을 적용하면 해당 시간 스텝에서의 θ_k 가 설정한 임계값보다 크기 때문에 1번 코드북을 선택하게 된다. 해당 이동속도에서는 기존의 방법과 제안하는 방법에서 모두 동일한 코드북을 선택한다.

그림 4는 사용자 단말 이동속도 2 km/h ($\epsilon=0.994$)에서의 성능을 나타낸다. 그림 4를 보면 초기 시간 스텝 범위에서는 1번 코드북이 2번 코드북보다 약 0.032 (bits/sec/Hz) 뛰어난 성능을 보이지만 시간 스텝 $k = 7$ 부터는 2번 코드북이 1번 코드북보다 약 0.021 (bits/sec/Hz) 나은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 적응형 코드북은 초기 시간 스텝 구간에서는 성능이 뛰어난 1번 코드북, $k = 7$ 부터는 2번 코드북을 선택하여 모든 시간 스텝에서 항상 기존 차분 코드북보다⁸⁾ 뛰어난 성능을 보인다.

표 4는 이동속도 2 km/h ($\epsilon=0.994$)에서 수식에 따른 차분 코드북 선택의 차이를 나타낸다. 그림 4에서 초기 시간 스텝 $k = 1$ 에서 $k = 6$ 인 구간에서는 1번 코드북이 그 이후의 구간에서는 2번 코드북이 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있었다. 따라서 적응형 기법이 가장 좋은 성능을 보이기

표 4. 이동속도 2 km/h에서 차분 코드북 선택
 Table 4. Codebook selection when the velocity is 2km/h

Time step	Conventional θ_k [8]	Selected codebook	Proposed θ_k	Selected codebook
1	180	Codebook 1	180	Codebook 1
2	100.0717	Codebook 1	70.4712	Codebook 1
3	66.5591	Codebook 1	58.7018	Codebook 1
4	46.1937	Codebook 1	40.3510	Codebook 1
5	33.9452	Codebook 1	29.5334	Codebook 1
6	27.2835	Codebook 1	23.6986	Codebook 1
7	24.0702	Codebook 1	20.8936	Codebook 2
8	22.6652	Codebook 1	19.6688	Codebook 2
9	22.0862	Codebook 2	19.1644	Codebook 2
10	21.8544	Codebook 2	18.9625	Codebook 2
11	21.7627	Codebook 2	18.8826	Codebook 2
12	21.7266	Codebook 2	18.8512	Codebook 2
13	21.7125	Codebook 2	18.8389	Codebook 2
14	21.7069	Codebook 2	18.8340	Codebook 2
15	21.7047	Codebook 2	18.8322	Codebook 2
16	21.7039	Codebook 2	18.8314	Codebook 2
17	21.7036	Codebook 2	18.8311	Codebook 2
18	21.7034	Codebook 2	18.8310	Codebook 2
19	21.7034	Codebook 2	18.8310	Codebook 2
20	21.7033	Codebook 2	18.8309	Codebook 2

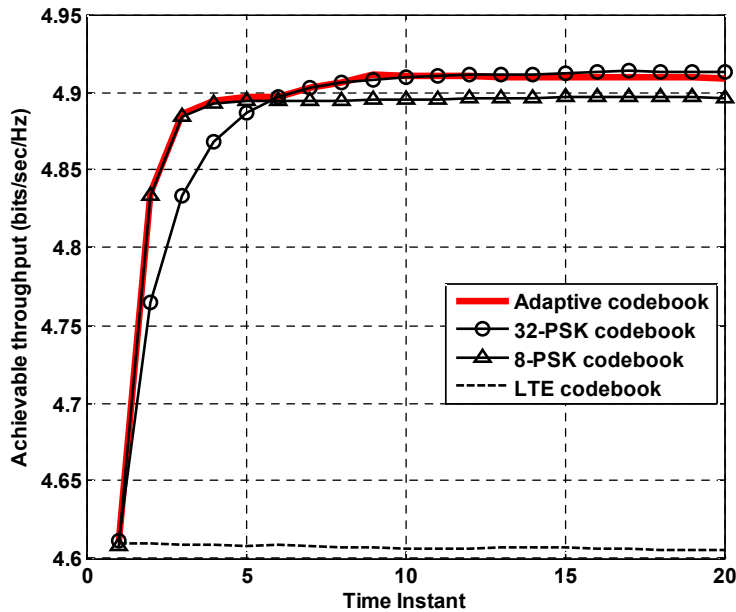


그림 4. 이동속도가 2 km/h ($\epsilon=0.994$)일 때 제안하는 기법의 성능
 Fig. 4. Achievable throughput when the velocity is 2km/h

위해서는 초기 시간 스텝 구간에서 1번 코드북을 선택하고 $k = 7$ 또는 $k = 8$ 부터는 2번 코드북을 선택해야 한다. 제안하는 수식을 적용한 결과는 앞의 설명처럼 초기 시간 스텝 $k = 1$ 에서 $k = 6$ 인 구간에서는 1번 코드북을, 그 이후의 시간 스텝에서는 2번 코드북을 선택했음을 확인할 수 있다. 반면에 기존의 수식을 적용한 결과에서는^[8] 초기 시간 스텝 범위를 넘어 2번 코드북의 성능이 1번 코드북보다 높게 나타나는 $k = 8$ 까지 1번 코드북을 선택하고 그 이후의 시간 스텝이 되어서야 2번 코드북을 선택함을 확인할 수 있다. 결과적으로 기존의 수식을 적용한 적응형 기법은 일부 시간 스텝에서 성능이 떨어졌지만 제안하는 수식을 적용한 적응형 기법은 모든 시간 스텝에서 기존의 차분 코드북보다 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 5는 사용자 단말 이동속도 3 km/h ($\epsilon=0.988$)에서의 성능을 나타낸다. 앞서 시뮬레이션 했던 1 km/h 및 2 km/h와 달리 3 km/h에서는 2번 코드북이 1번 코드북보다 나은 성능을 보이는 구간이 존재하지 않는다. 따라서 제안하는 적응형 기법뿐만 아니라 기존의 수식을 적용한 적응형 기법도 모든 구간에서 1번 코드북을 선택하게 되며 이는 표 5에서 확인할 수 있다.

표 5는 이동속도 3 km/h ($\epsilon=0.988$)에서의 적용하는 수식

표 5. 이동속도 3km/h에서 차분 코드북 선택

Table 5. Codebook selection when the velocity is 3km/h

Time step	Conventional θ_k [8]	Selected codebook	Proposed θ_k	Selected codebook
1	180	Codebook 1	180	Codebook 1
2	100.5946	Codebook 1	90.9880	Codebook 1
3	68.0962	Codebook 1	60.1106	Codebook 1
4	49.3292	Codebook 1	43.1431	Codebook 1
5	38.9158	Codebook 1	33.9077	Codebook 1
6	33.7890	Codebook 1	29.3962	Codebook 1
7	31.5275	Codebook 1	27.4124	Codebook 1
8	30.5973	Codebook 1	26.5974	Codebook 1
9	30.2278	Codebook 1	26.2738	Codebook 1
10	30.0832	Codebook 1	26.1472	Codebook 1
11	30.0269	Codebook 1	26.0980	Codebook 1
12	30.0051	Codebook 1	26.0789	Codebook 1
13	29.9967	Codebook 1	26.0715	Codebook 1
14	29.9934	Codebook 1	26.0686	Codebook 1
15	29.9921	Codebook 1	26.0675	Codebook 1
16	29.9916	Codebook 1	26.0670	Codebook 1
17	29.9914	Codebook 1	26.0669	Codebook 1
18	29.9914	Codebook 1	26.0668	Codebook 1
19	29.9913	Codebook 1	26.0668	Codebook 1
20	29.9913	Codebook 1	26.0668	Codebook 1

에 따른 코드북 선택을 정리한 것이다. 기존의 기법은 해당 결과를 보면 적용한 수식에 상관없이 모든 시간 스텝 구간

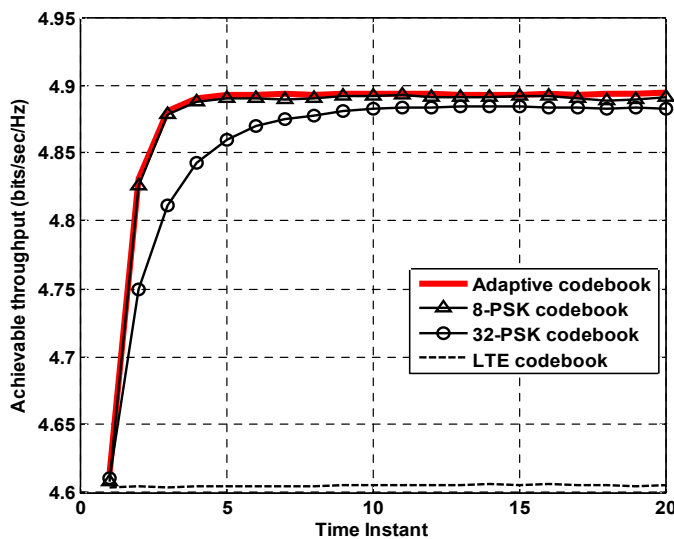


그림 5. 이동속도가 3 km/h ($\epsilon=0.988$)일 때 제안하는 기법의 성능
Fig. 5. Achievable throughput when the velocity is 3km/h

에서 1번 코드북을 선택하는 것을 알 수 있다.

1 km/h의 경우 초기 시간 스텝 범위가 $k=1$ 에서 $k=4$ 이지만, 2 km/h는 시간 스텝 $k=1$ 에서 $k=6$ 으로 이동속도의 증가에 따라 1번 코드북이 2번 코드북보다 나은 성능을 보이는 시간 스텝의 구간이 더 늘어났고, 2번 코드북이 나은 성능을 보이는 시간 스텝 구간에서도 실제 성능의 경우에도 1 km/h의 경우 평균 약 0.037 (bits/sec/Hz) 그리고 2 km/h의 평균 약 0.015 (bits/sec/Hz)로 1번 코드북과의 성능 차가 감소함을 확인 할 수 있다. 이후 이동속도가 조금씩 증가할수록 성능 차는 점점 더 줄어들며, 3 km/h의 경우에는 2번 코드북이 모든 시간 스텝에서 떨어지는 성능을 보였다. 사실상 이동속도 2 km/h가 2번 코드북이 1번 코드북보다 나은 성능을 보이는 임계속도라고 볼 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 느리게 변하는 페루프 MISO 채널에서 위상 쉬프트 키잉 성운을 가지는 적응형 차분 코드북을 제안하였다. 사용자 단말의 이동속도가 증가함에 따라 시간 상관에 따른 채널 변화 범위도 증가하게 되므로 2번 코드북은 저속에서 1번 코드북보다 나은 성능을 보인다. 시간 스텝에 따라 위상을 이용하는 채널 추적 능력을 조사하였는데, 이는 위상 변화 범위의 임계각을 결정하여 적응적으로 변화시킬 수 있었다. 본 논문에서는 코드워드 위상 변화 범위를 계산하는 기존의 수식보다 효율적인 새로운 수식을 제안하였다. 제안하는 새로운 수식은 기존의 수식에 비해 자연스러운 수식의 유도 및 풀이를 하였으며, 일부 이동속도 및 시간 스텝에서 성능 향상을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과로부터 제안하는 적응형 기법은 피드백 정보의 양이 동일할 때, 다른 후보 코드북보다 뛰어난 적절한 코드북을 선

택하였으나 이동속도가 1km/h인 경우의 일부 시간 스텝에서 상대적으로 성능이 떨어지는 코드북을 선택했다. 이동속도 1km/h 이외의 구간에서 적응형 기법은 모든 시간 스텝에서 가장 적절한 코드북을 선택했으며 기존의 기법보다 항상 뛰어난 성능을 보였다. 제안하는 수식을 적용한 기법은 기존의 기법과 동일한 임계각을 설정 가능하며 대체적으로 동일한 성능을 보이거나 2km/h와 같이 일부 이동시간 및 시간 스텝에서 기존의 기법보다 성능이 향상됨을 보였다.

참 고 문 헌 (References)

- [1] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *Europ. Trans. Telecommun.*, Vol.10 No.6, pp.586-594, 1999.
- [2] V. Jungnickel, K. Manolakis, W. zirwas, B. Panzner, V. Braun, M. Lossow, M. Sterna, R. Apelfrojd and T. Svensson, "The role of small cell, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G," *IEEE Communications Magazine*, Vol.52, No.5, pp.44-50, 2014.
- [3] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.49, No.11, pp.3590-3600, 2010.
- [4] L. Zheng and D. N. C. Tse, "Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, Vol.49, No.5, pp.1073-1096, 2003.
- [5] D. J. Love, R. W. Heath, V. K. N. Lau, D. Gesbert, B. D. Rao and M. Andrews, "An overview of limited feedback wireless communication systems," *IEEE J. Sel. Areas, Commun.*, Vol.26, No.8, pp.1341-1365, 2008.
- [6] D. J. Love, R. W. Heath, "Equal gain transmission in multiple-input multiple-output wireless systems," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol.51, No.7, pp.1102-1110, 2003.
- [7] X. Li, S.G. Kim and Y. J. Kim, "Equal gain differential precoding technique for temporally correlated channels," *The Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol.49, No.1, pp.11-18, 2012.
- [8] Y. J. Kim, C. W. Seo, "An adaptive differential equal gain transmission technique using M-PSK constellations," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol.53, No.3, pp.332-339, 2016.

저 자 소 개



김 영 주

- 1988년 ~ 1993년 : LG전자
- 1996년 ~ 1997년 : 동경공업대학 연구원
- 1994년 ~ 2001년 : 한국과학기술원 석박사
- 2003년 ~ 현재 : 충북대학교 전자정보대학 정보통신공학부 교수
- 2011년 ~ 2012년 : 퍼듀대학 교환교수
- ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-5844-8612>
- 주관심분야 : 소프트웨어라디오, 이동통신