

논문 2015-52-1-4

# MIMO 시스템에서 M-PSK 성운을 이용한 새로운 차분 동 이득 전송 기술

( A Novel Differential Equal Gain Transmission Technique using  
M-PSK Constellations in MIMO System )

김 영 주\*, 서 창 원\*\*, 박 노 윤\*\*

( Young-Ju Kim<sup>Ⓞ</sup>, Chang-Won Seo, and Noeyoon Park )

## 요 약

코드워드의 인자로 M진 위상 편이 방식(M-ary phase shift keying, M-PSK)를 사용하는 차분 코드북은 Long term Evolution (LTE), LTE-Advanced (LTE-A) 그리고 WiMax 시스템 등에 제안된다. 인접하는 무선 채널의 시간 상관 특성에 의해 연속된 선부호화 행렬 내 양자화된 채널 정보는 천천히 변화된다. 이는 전체 무선 채널 공간을 양자화 하지 않고, 시간 상관 특성에 따른 채널 공간 내 일부분만을 양자화하여 피드백하기 때문에 기존과 동일한 크기의 코드북을 구성해도 가상적으로 보다 정확한 채널정보를 양자화할 수 있어 채널 용량이 증가하는 효과를 갖는다. 제안하는 코드북은 constant modulus, complexity reduction, 그리고 nested property와 같은 LTE release-8 코드북 특성을 갖는다. 또한 동 이득 전송 특성을 갖기 때문에 상대적으로 저렴한 비선형 증폭기를 사용할 수 있어 가격의 제한을 받는 단말기 설계에도 이점을 갖는다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 차분 동 이득 전송 기술은 동일한 피드백 비트 수를 갖는 기존의 LTE-8 코드북보다 향상된 성능을 보인다.

## Abstract

A differential codebook using M-ary phase shift keying (M-PSK) constellation as its codeword elements, is proposed for Long term evolution (LTE), LTE-Advanced (LTE-A), and/or WiMAX systems. Due to the temporal correlation of the adjacent channel, the consecutive precoding matrices are likely to be similar. This approach quantize only the differential information of the channel instead of the whole channel subspace, which virtually increase the codebook size to realize more accurate quantization of the channel. Especially, the proposed codebook has the same properties of LTE release-8 codebook that is, constant modulus, complexity reduction, and nested property. The mobile station can be designed by using a less expensive non-linear amplifier utilizing the constant modulus property. Computer simulations show that the capacity of the proposed codebook performs better than LTE release-8 codebook with the same amount of feedback information.

**Keywords** : Closed-loop MIMO, differential codebook, LTE, LTE-A

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

Ⓞ Corresponding Author (E-mail: yjkim@cbnu.ac.kr)

※ 이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업  
의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

접수일자: 2014년11월11일, 수정일자: 2014년12월07일

게재확정: 2014년12월26일

## I. 서 론

LTE-Advanced (LTE-A) 및 WiMAX의 표준화는 코드북을 이용하는 폐회로 다중 송수신 안테나 (multiple-input multiple-output, MIMO) 기술을 폭넓게 적용하였는데, 이는 또한 선부호화 기법(precoded method)로도

잘 알려져 있다<sup>[1~2]</sup>. 코드북은 선부호화 이득과 피드백 정보의 요구량 사이에서 최적의 성능을 얻기 위해 일정 크기의 양자화 된 채널 상태 정보(quantized channel state information, CSI)를 송수신단에 공유함으로써 원하는 코드워드에 대응되는 선부호화 행렬 인덱스(precoding matrix index, PMI)만을 수신단에서 송신단으로 피드백하는 것으로 피드백 오버헤드 및 지연 등에 의해 발생하는 영향을 최소화할 수 있는 장점을 갖는다<sup>[3~5]</sup>.

코드북 내 채널 상태 정보를 일정 크기로 양자화하기 위해 채널 상태 정보간의 최소 chordal 거리를 최대화하는 Grassmannian subspace packing 방법이 연구되었고<sup>[3][4]</sup>, 특이값 분해(singular value decomposition, SVD)를 이용한 Lloyd 알고리즘 방법 또한 코드북을 설계하기 위해 연구되었다<sup>[5]</sup>.

양자화 된 최대 비 전송(quantized maximum ration transmission, QMRT) 기법에 따른 코드북 설계 연구와 함께 진폭이 일정한 양자화 된 동 이득 전송(quantized equal gain transmission, QEGT) 기법에 따른 코드북 설계 연구도 스칼라 양자화와 벡터 양자화 방식을 포함하여 활발히 진행되고 있다.<sup>[6~9]</sup>

양자화 된 동 이득 전송 기법은 양자화 된 최대 비 전송 기법에 비해 항상 부최적(sub-optimum) 성능을 갖지만, 양자화 된 동 이득 전송 기법의 일정한 진폭 특성은 레이더 시스템의 하이엔드 송신기를 포함하여 저가형 전송 전력 증폭기의 설계에서 반드시 고려되는 요소이다. 이러한 이유로 LTE 표준화 포럼에서는 코드북 설계와 관련하여 이를 고려하였고, 결국 코드북 내 인자를 구성 시 8-PSK 성운을 사용하는 것을 LTE release-8 및 release-9 시스템에서 채용하였다<sup>[10~11]</sup>.

코드북 설계와 관련하여 기존의 연구들은 무선 채널을 플랫(flat) 페이딩 채널로 가정함으로써 실제 발생 가능한 채널의 시간 상관관계를 고려하지 않았다. 항상된 채널 이득을 얻기 위해 채널의 시간 상관관계를 고려하여 준-대각(quasi-diagonal) 단위행렬을 이용하거나, 차분 회전 성질을 이용한 실시간 적응형 구조 및 구면 캡(spherical cap) 방식의 설계 기법 등을 이용, Procrustes 또는 Gram-Schmidt 직교화 기법을 적용한 차분(differential) 코드북의 설계에 대한 연구가 진행되었다<sup>[12~13]</sup>. 또한 LTE release-10은 차등 또는 적응 코드북과 유사성을 가지는 듀얼 코드북 구조를 논의하고 있고<sup>[14]</sup>, IEEE 802.16m에서는 변형 기반의 차등 코드북

표준화 방안이 채택되었다<sup>[2, 15]</sup>.

지금까지 진행된 다양한 차분 코드북 설계 연구는 채널 용량 이득에 있어서는 좋은 성능을 보이지만, M-PSK 성운 제약을 포기함으로써 복잡도 감소, 내포된 특성 및 일정한 진폭 특성에 따른 LTE 코드북 설계 기준을 준수하지 않았다. LTE 시스템에서는 차분 코드북을 이용하였을 경우 복잡도가 커지게 되므로 이를 채택하지 않았다. 또한 첨두 전력 대 평균 전력비 (peak-to-average ratio, PAPR)의 증가, 증폭기 왜곡에 따른 효율 저하, 그리고 in-band & out-of-band 신호 간섭 등의 문제가 발생되었다<sup>[7]</sup>.

양자화된 동 이득 전송 방식을 사용한 차분 코드북은 각 송신 안테나의 파워를 제한하기 때문에 PAPR을 감소시키는 효과를 가져온다. 또한, 양자화 된 최대 비 전송 방식의 코드북에 비해 이론적인 성능이 약간 감소하지만, 비선형 증폭기를 사용하는 실제 시스템에서는 최대 비 전송 방식보다 우수한 성능을 얻을 수 있다. 이에 따라 차분 위상 행렬을 이용한 동 이득 전송 방식 기반의 간단한 차분 코드북 생성 방법과 계산적 평이성 및 LTE release-8 코드북 설계 기준의 완벽한 호환성을 위해 활용되고 있는 8-PSK 성운간의 조합을 이용한 양자화된 동 이득 전송 방식 기반의 차분 코드북이 연구되었다<sup>[16~17]</sup>.

본 논문에서는 8-PSK 성운간의 조합을 M-PSK 성운간의 조합으로 확장, 채널의 시간 상관 특성에 따른 성능 향상과 성운에 따른 계산적 복잡도 증가 사이의 trade-off 관계를 일반화한다. M-PSK 성운간의 조합에 따라 생성되는 차분 코드북은 LTE release-8 코드북 설계 기준을 따르고, PAPR의 불필요한 증가를 방지하는 장점을 가진다. 2010년에는 LTE release-10에서 사용할 차분 코드가 결정되었고, 제안하는 시스템은 동 이득 전송이 매우 중요한 레이더 시스템에 적용할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델과 현재 연구된 코드북 설계의 문제점을 소개한다. III장에서는 차분 선부호화 방식을 설명하고, 제안하는 M-PSK 성운을 이용한 새로운 차분 코드북 설계 방법을 설명한다. IV장에서는 시뮬레이션 결과를 분석한다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

다음의 수식 기호들이 본 논문에서 사용된다.  $U(k, l)$ 은 서로 직교하는 정규화된 열을 갖는  $k \times l$  크기의 행렬

을 의미한다.  $\mathbf{I}_k$ 는  $k \times k$  크기의 단위행렬이다. 진한 대문자  $\mathbf{A}$ 가 행렬, 진한 소문자  $\mathbf{a}$ 는 벡터,  $\mathbf{A}^T$ 는 전치행렬,  $\mathbf{A}^H$ 는  $\mathbf{A}$ 의 복소 전치행렬,  $\mathbb{C}^k$ 는  $k$ 차원의 복소 공간 그리고  $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{k \times l}$ 은 복소 행렬  $\mathbf{A}$ 가  $k$ 개의 행과  $l$ 개의 열을 가짐을 의미한다.  $\mathbf{A}\mathbf{B}$ 는 행렬  $\mathbf{A}$  및 행렬  $\mathbf{B}$ 의 곱 그리고  $\langle \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \rangle$ 는  $\mathbf{A}$ 와  $\mathbf{B}$ 의 Hadamard 행렬곱을 나타낸다.

## II. 시스템 모델

폐회로 다중 송수신 안테나 시스템에서 송신 안테나 수를  $M_t$ , 수신 안테나 수를  $M_r$ , 그리고 공간 스트림 수를 1로 정의한다. 그림 1은 간단한 다중 송수신 안테나 시스템의 블록도이다. 수신부에서 송신부로  $B$  비트의 코드북 내 코드워드를 피드백 한다고 가정할 때, 송수신부는  $N = 2^B$  크기의 동일한 코드북을 서로 공유한다. 코드북  $\mathbf{w}_k = \{\mathbf{w}_{k,1}, \dots, \mathbf{w}_{k,N}\}$ 을 정의할 때  $k$ 는 시간 인덱스 (time index)로, 매 시간 인덱스마다 차분 코드북이 생성되며 이 때,  $\mathbf{w}_{k,n} \in \mathbb{C}^{M_t \times 1}$ ,  $n = 1, \dots, N$ 은 CSI를 이용한  $n$ 번째 코드워드를 의미한다.

시간에 따른 연속적인 채널에서 수신부는 코드북 내 코드워드 중 채널 용량을 최대화하는  $n_{opt}$ 번째 코드워드를 선택,  $B$  비트로 구성된 인덱스  $n_{opt}$ 만을 송신부로 피드백한다. 송신부는 수신된 인덱스  $n_{opt}$ 를 이용하여 시간 인덱스  $k$ 에서 생성된 코드북  $\mathbf{w}_k$  중에서  $\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_{k,n_{opt}}$ 인 코드워드를 선택한다. 수신 신호  $\mathbf{y}_k$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

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

이 때  $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{M_r \times M_t}$ 은 시간 인덱스  $k$ 에서 평균이 0이고 분산이 1인 서로 독립적이고 동일한 분포(independent and identically distributed, i.i.d.) 갖는 비상관성 레일리 플랫 페이딩 채널 행렬이다.  $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{M_r \times 1}$ 는 i.i.d. 특성을 갖는 평균은 0이고 분산은 1인 가산성 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN) 벡터 그리고  $\rho$ 은 신호 대 잡음 전력비 (signal-to-noise power ratio, SNR)를 의미한다. 한편, 시간 상관성 채널은 식 (2)에 의한 1차 가우스-마르코프 체인 모델을 가정한다.

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

이때  $\mathbf{G}_k \in \mathbb{C}^{M_r \times M_t}$ 은 i.i.d.를 갖는 평균이 0이고 분산이 1인 비상관성 레일리 플랫 페이딩 채널 행렬이다. 잡음 성분  $\mathbf{n}_k$ 는  $\mathbf{G}_k$ 와  $\mathbf{H}_0$ 에 독립인 것으로 가정한다. 초기 상태  $\mathbf{H}_0$  또한 모든 시간 인덱스  $k$ 에 대해  $\mathbf{G}_{k+1}$ 와 독립인 것으로 가정한다.  $\epsilon$  ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ )는 시간 상관 계수로서 인접한 채널 정보  $\mathbf{H}_{k-1}$ 와  $\mathbf{H}_k$  간의 상관성을 나타내는데,  $\mathbf{H}_k$ 의 모든 인자는 동일한 시간 상관 계수  $\epsilon$  값을 갖는다고 가정한다. 다중 사용자 및 공간 상관성은 본 시스템 모델에서 고려하지 않는다. 채널 상관 계수  $\epsilon$ 는  $\epsilon = J_0(2\pi f_D T)$ 로 Jakes 모델을 따른다. 이때,  $J_0(\cdot)$ 는 0차 베셀 함수,  $T$ 는 시간 스텝 주기(또는 간격, channel instant interval) 그리고  $f_D = v f_c / c$ 는 단말기

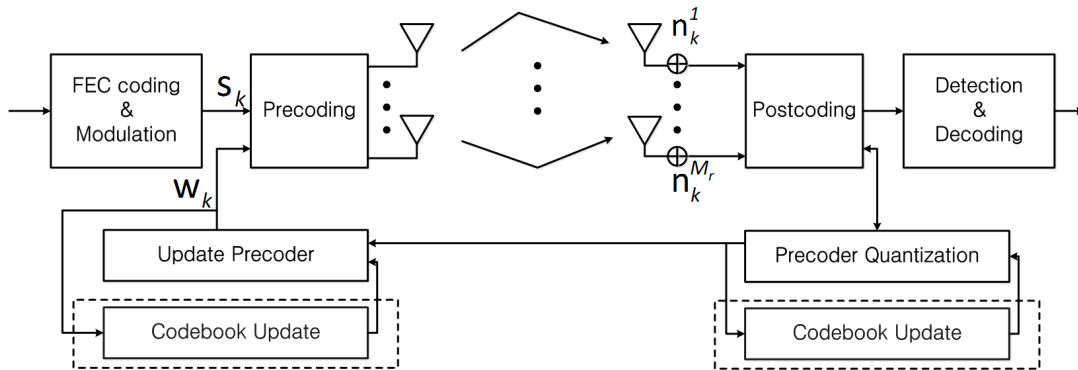


그림 1. 폐회로 다중 송수신 안테나 시스템 블록도

Fig. 1. Block diagram of a closed-loop multiple antennas system.

속도  $v$ , 반송 주파수  $f_c$ , 그리고  $c = 3 \times 10^8 m/s$  로 계산되는 최대 도플러 주파수이다.

### III. 단일 계층 차분 선부호화 시스템

#### 1. 기존의 차분 코드북 시스템

LTE 시스템 그리고 WiMAX 시스템 등의 일반적인 코드북 설계는 무선 채널의 시간 상관을 고려하지 않는다. 그러나 최근의 연구는 폐회로 MIMO 시스템의 링크 레벨 성능 개선을 위하여 시간 상관 특성을 활용하는 것을 고려하고 있다<sup>[2, 13~15]</sup>. 양자화 된 차분 피드백 시스템에서는 채널 공간의 일부분만이 양자화 되는데, 이는 시간에 따라 변화되는 차분 코드북 내 코드워드에서 양자화 왜곡을 감소시키기 위한 것이다. 즉, 현재 시간 인덱스에서 양자화 된 부공간은 이전 시간 인덱스에서 양자화 된 부공간에 영향을 미친다. 따라서 차분 코드북은 동일한 피드백 오버헤드를 갖는 기존의 코드북보다 채널 부공간의 양자화가 보다 정확하게 실현된다. 송수신단에서는 동일한 코드북 업데이트 방법을 사용하여 모든 시간 인덱스에서 동일한 차분 코드북이 업데이트 되도록 보장되는데, [12]에서 제안된 코드북의 업데이트 과정은 다음의 식과 같다.

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_{diff} \mathbf{w}_{k-1} \quad (3)$$

이때  $\mathbf{w}_{diff}$ 은 차분 코드북  $\mathbf{w}_{diff}$ 에서 시간 인덱스  $k$  일 때 선택된 최적 코드워드으로써 대각 성분의 값이 거의 일정하고

대각 성분외의 값은 거의 0이 되기 때문에 준-대각 행렬이라 불린다. 차분 코드북  $\mathbf{w}_{diff}$ 는 다수의 랜덤 정방 (square) 행렬을 이용하여 평균 상호 정보(mutual information)을 최대화하는 코드워드인  $\mathbf{w}_{diff,n} \in \mathcal{U}(M_t, M_t)$ ,  $1 \leq n \leq N$ 의 집합으로 구성된다.

[18], [19]에서는 차분 코드북을 설계할 때, 구면 캡 안에서 작은 변화 (perturbation)를 일으켜 변화가 일어난 행렬 (perturbed matrix)을 유니터리 공간 (unitary space)에 투영하여 설계하는 방법을 제안하였다. 특히, [13]에서는 구면 캡의 반지름  $r_k$ 를 채널 방향 변화 (channel directional variation)의 영향과 누적된 양자화 오차를 모두 고려하여 매 시간 인덱스 또는 어느 일정한 조건이 만족되었을 때 결정함으로써 식 (4)를 이용, 차분 코드북 내 코드워드들을 구성하였다.

$$\mathbf{w}_k = \text{proj} (r_k \mathbf{I}_{M_t} + \sqrt{1-r_k} \boldsymbol{\Theta}) \mathbf{w}_{k-1} \quad (4)$$

$\text{proj}(\cdot)$ 은 투영 함수를 의미하고,  $\boldsymbol{\Theta} \in U(k, l)$ 는 임의의 회전 행렬 기반의 코드워드들로 구성된 차분 코드북이다. 그리고 Procrustes 또는 Gram-Schmidt 열 직교화 기법을 이용하여 투영 함수를 구할 수 있다[20]. 이러한 구면 캡에서의 차분 코드북은 Grassmannian 공간에서 얻을 수 있으며, 전체 전력을 일정하게 하는 양자화 된 최대 비 전송 방법과 각 안테나 송신 전력이 동일하게 하는 양자화 된 동 이득 전송 방법이 있다.

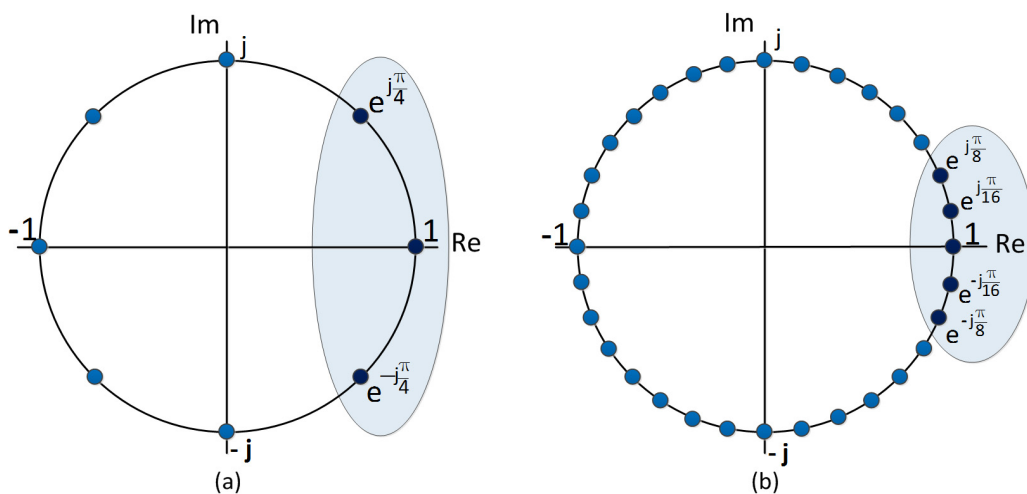


그림 2. (a) 8-PSK 성운도, (b) 32-PSK 성운도  
Fig. 2. (a) 8-PSK constellation, (b) 32-PSK constellation.

## 2. 제안하는 차분 코드북의 설계와 동작 기법

제안하는 차분 코드북은  $\mathbf{w}_{diff} = \{\mathbf{w}_{diff,1} \cdots \mathbf{w}_{diff,N}\}$  으로 표현된다. 여기서  $\mathbf{w}_{diff,n} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ,  $n = 1, \dots, N$ 은 차분 코드북의  $n$ 번째 코드워드으로써 M-PSK 성운을 인자로 갖는다. 송신부와 수신부는 식 (5)를 이용하여 이전에 선부호화 된 벡터  $\mathbf{w}_{k-1,n_{opt}}$ 와 차분 코드북  $\mathbf{w}_{diff}$ 을 이용하여 매 시간 인덱스  $k$ 에서 새로운 코드북  $\mathbf{w}_k$ 가 계속 업데이트된다.

$$\mathbf{w}_{k,n} = \langle \mathbf{w}_{diff,n} \cdot \mathbf{w}_{k-1,n_{opt}} \rangle \quad (5)$$

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 Hadamard 곱으로서 이를 통해  $\mathbf{w}_k$ 의  $n$ 번째 코드워드  $\mathbf{w}_{k,n}$ 을 얻는다. 즉, 각 시간 인덱스에서 코드

표 1. 최소 chordal 거리에서의 제안하는 8-PSK 차분 코드북.

Table 1. Propose 8-PSK differential codebook.  
(codebook with the minimum chordal distance)

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

북 내 코드워드들은 연속적으로 변경된다. 초기의 시간 인덱스  $k = 1$ 에서는 이전 시간 인덱스에서의 최적 코드워드가 없기 때문에 차분 코드북이 아닌 LTE release-8 코드북과 같은 기존의 코드북을 이용하고 제안하는 차분 코드북은  $k \geq 2$ 부터 적용된다.

식 (5)를 통해 제안하는 차분 코드북은 송신부와 수신부에서 동시에 업데이트되어야 한다. 수신부에서는 하향링크 채널 행렬인  $\mathbf{H}_k$ 를 추정하고 이를 이용하여 현재의 코드북  $\mathbf{w}_k$ 에서 최적의 코드워드  $\mathbf{w}_{k,n_{opt}}$ 를 선택한다. 최적의 인덱스  $n_{opt}$ 는 식 (6)과 같이 채널 용량을 최대 하도록 선택할 수 있다.

$$n_{opt} = \arg \max_{1 \leq n \leq N} (1 + \rho \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_{k,n}\|_2^2) \quad (6)$$

표 2. 최소 chordal 거리에서의 제안하는 32-PSK 차분 코드북.

Table 2. Propose 32-PSK differential codebook.  
(codebook with the minimum chordal distance)

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

본 논문에서는 선부호화 행렬의 코드워드에 대해 모두  $M$ -PSK 성운을 가지는 것이 아니라 1개의 주위에 오직 3 혹은 5개의 성운을 갖는 다중 스트림 차분 코드북을 설계한다. [17]에서는 그림 2.(a)와 같이 8-PSK 성운을 고려하여 표 1에 나타난 바와 같이 차분 코드북 내 코드워드를 결정하였다. 본 논문에서 제안하는 차분 코드북은 그림 2.(b)에서 나타난 바와 같이 32-PSK 성운을 고려한다. 이 때, 32개의 성운에서

$w_{diff}$ 의 코드워드으로써 5개의 성운  $e^{j\frac{4\pi}{M}}$ ,  $e^{j\frac{2\pi}{M}}$ ,  $1$ ,  $e^{-j\frac{2\pi}{M}}$  그리고  $e^{-j\frac{4\pi}{M}}$  를 이용한다. 5개 이상의 성운을 사용할 경우에는 throughput의 개선이 있음을 예측할 수 있고, 컴퓨터 모의실험에서 확인할 수 있으므로 본 논문에서 고찰한다.

차분 코드북 내 최적 코드워드를 결정하기 위해 [17]에서 제안한 설계 방법을 이용하여 코드워드를 결정한다. 예를 들어  $M_t = 4$ ,  $N = 16$  인 경우, 제안하는 차분 코드북의 주 선부호화 코드워드는  $w_{diff,1} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ 로서 시간 인덱스 간의 채널 변화가 발생하지 않음을 의미한다. 코드북의 크기  $N$ 이 16으로 고정되어있을 때,  $w_{diff,1}$ 에 근접한 chordal 거리를 가지는 나머지 15개의 선부호화 코드워드를 결정하기 위해 먼저 5개의 성운으로 발생 가능한 모든 경우의 수 즉, 후보 차분 코드북을 생성한다. 그리고 동일한 시간 상관 계수 값을 갖는 수로 발생 가능한 모든 경우의 수 즉, 후보 차분 코드북을 생성한다. 그리고 동일한 시간 상관 계수 값을 갖는 수많은 채널을 생성하여 식 (6)에 기반하여 채널 용량을 최대화하는 특정 후보 코드북을 최종 차분 코드북으로 결정한다. 이를 통해 생성된 32-PSK 차분 코드북을 표 2에 나타낸다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

Monte-Carlo 시뮬레이션은 제안하는 선부호화 방식의 용량 성능을 설명하기 위해 실시되었다. 또한 제안하는 차분 코드북에 의한 성능은 저속 페이딩 MIMO 채널에서 이상적인 동 이득 전송 기법 및 LTE release-8 코드북과 그 성능을 비교하였다. 시뮬레이션은 각각의 시간 인덱스에서 150만 번 이상을 반복 실시하였는데, 시간 상관 채널의 변화는 1차 Gauss-Markov

표 3. 성능 분석용 시뮬레이션 파라미터.

Table 3. Simulation parameters for performance analysis.

파라미터	Value
단말의 이동속도	1 km/h, 3 km/h, 5 km/h
이동속도에 따른 시간 상관 계수 ( $\epsilon$ )	0.999, 0.988, 0.967
피드백 간격	5ms
반송 주파수 ( $f_c$ )	2.5 GHz
송신 안테나 수 ( $M_t$ )	4
수신 안테나 수 ( $M_r$ )	1
코드북 내 코드워드 수 ( $N$ )	16
SNR	10

프로세스 및 모델링하였고, 1 km/h, 3 km/h 및 5 km/h의 단말 속도, 5ms의 피드백 간격 그리고 2.5 GHz의 반송 주파수에 대한 시간 상관 계수  $\epsilon$ 는 0.999, 0.988 그리고 0.967이다. 또한 피드백 채널은 에러가 발생하지 않고, 채널 추정 및 동기화는 완벽하며 송신 및 수신 안테나 사이에 공간 상관성이 없다고 가정한다.

그림 3, 4 및 그림 5는 송신 안테나 수는 4, 수신 안테나 수는 1, 코드북 내 코드워드 수는 16, SNR은 10dB로 고정, 그리고 사용자의 이동속도가 각각 1 km/h, 3km/h 및 5km/h인 경우 각 시간 인덱스에서 평균적으로 획득 가능한 채널 용량을 나타낸다. 본 시뮬레이션에서는 목표 throughput을 얻기 위해 필요한 이득을 dB로 표현하였다. 결과 그래프의 y축은 throughput이며 x축은 차분 코드북이 천이되면서 보이는 성능을 나타낸다. 그림 3은 사용자의 이동속도가 1 km/h 인 경우 성능을 나타낸 것으로 제안하는 32-PSK 차분 코드북은 채널 용량의 수렴 범위에서 LTE release 8 코드북보다 0.3 dB의 성능 향상을 보인다. 제안된 코드북은 이상적인 동이득 전송 방법과 거의 동일한 성능을 가지면서 앞서 설명한 바와 같이 침투 전력 대 평균 전력비의 증가, 증폭기 왜곡에 따른 효율 저하 등의 문제가 상대적으로 적게 발생하는 장점을 갖는다.

그림 4 및 그림 5는 사용자의 이동속도가 3 km/h, 5 km/h 인 경우 성능을 나타낸 것으로 제안하는 32-PSK 차분 코드북은 채널 용량의 수렴 범위에서 LTE release 8 코드북보다 각각 0.25 dB, 0.12 dB의 성능 향상을 보인다. 그림 3, 그림 4 그리고 그림 5를 비교하면 사용자의 이동속도가 증가함에 따라 제안하는 코드북의 성능은

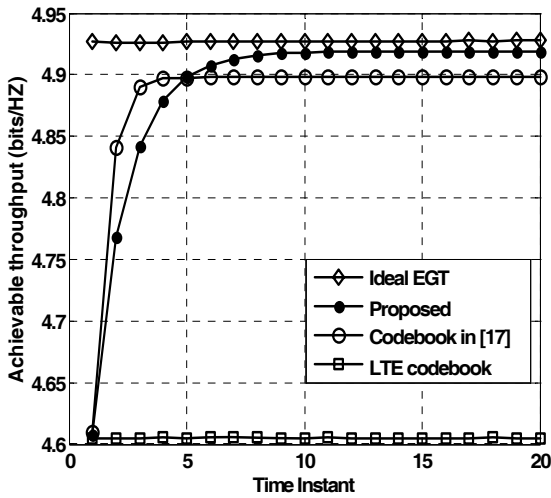


그림 3. 사용자의 이동속도가 1 km/h ( $\epsilon = 0.999$ ) 일 때 각 시간 인덱스에서의 평균 채널 정보량 비교

Fig. 3. Achievable throughput vs. time index performance of various differential codebook schemes when the user speed of 1km/h ( $\epsilon = 0.999$ ).

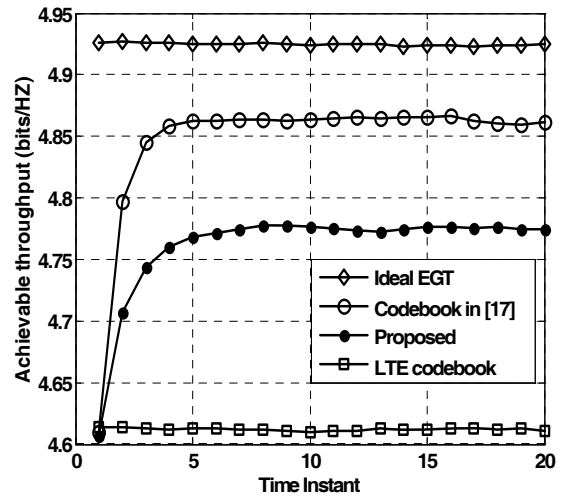


그림 5. 사용자의 이동속도가 5 km/h ( $\epsilon = 0.967$ ) 일 때 각 시간 인덱스에서의 평균 채널 정보량 비교

Fig. 5. Achievable throughput vs. time index performance of various differential codebook schemes when the user speed of 3km/h ( $\epsilon = 0.967$ ).

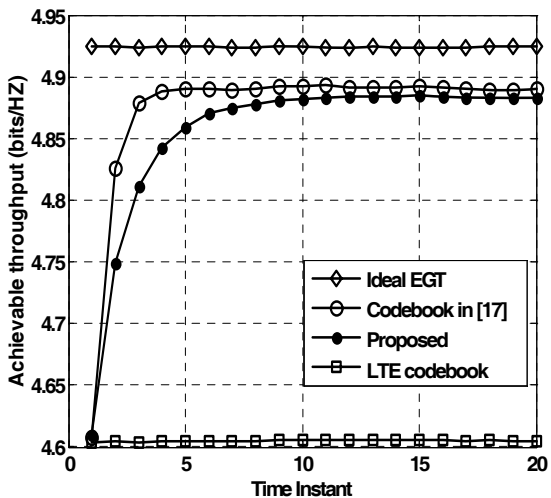


그림 4. 사용자의 이동속도가 3 km/h ( $\epsilon = 0.988$ ) 일 때 각 시간 인덱스에서의 평균 채널 정보량 비교

Fig. 4. Achievable throughput vs. time index performance of various differential codebook schemes when the user speed of 3km/h ( $\epsilon = 0.988$ ).

감소한다. 이는 사용자의 이동속도가 증가함에 따라 시간 상관에 따른 채널 변화의 범위가 증가하기 때문이다. 다시 말해 사용자의 이동속도가 느릴 경우 채널 변화의 범위가 줄어들어 제안하는 32-PSK 기반의 차분 코드북은 높은 정밀도를 갖는다.

## V. 결 론

본 논문에서는 천천히 변화하는 채널에서 32-PSK 성운 기반의 코드북을 이용한 폐회로 MIMO 시스템을 제안하였다. 제안하는 차분 코드북 내 코드워드 특성에 따라 제안하는 차분 코드북은 계산적 평이성 및 LTE release-8 코드북 설계 기준을 만족시킨다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 동 이득 전송 특성이 유지될 때 제안하는 차분 선부호화 시스템은 기존의 LTE release-8 코드북보다 향상된 성능을 보임을 나타낸다.

## REFERENCES

- [1] 3GPP TS 36.211 *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*, Release 9.1.0.
- [2] IEEE C802.16m-08/1182r1, Codebook design for IEEE 802.16m MIMO schemes, Sep. 2008.
- [3] D. J. Love, R.W. Heath Jr., and T. Strohmer, "Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, pp. 2735-2747, Oct. 2003.
- [4] D. J. Love and R. W. Heath Jr., "Limited

feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 51, pp. 2967-2976, Aug. 2005.

[5] S. A. Jafar and S. Srinivasa, "On the optimality of beamforming with quantized feedback," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, pp. 2288-2302, Dec. 2007.

[6] D. J. Love and R. W. Heath Jr., "Equal gain transmission in multiple-input multiple-output wireless systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 1102-1110, Jul. 2003.

[7] C. R. Murthy and B. D. Rao, "Quantization methods for equal gain transmission with finite rate feedback," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 55, pp. 233-245, Jan. 2007.

[8] X. Zheng, Y. Xie, J. Li, and P. Stoica, "MIMO Transmit beamforming under uniform elemental power constraint," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 55, pp. 5395-5406, Nov. 2007.

[9] N. Y. Park, X. Li and Y. J. Kim, "Enhanced codebook index search scheme for quantized equal gain transmission over LTE down link systems," *The journal of the institute of Electronics Engineers of Korea*, pp. 62-69, Jan. 2011.

[10] 3GPP LTE, "3GPP LTE Release-8 V0.0.9: evolved packet system RAN part," Dec, 2009.

[11] "IEEE P802.16m-2008 draft standard for local and metropolitan area network," IEEE Standard 802.16m, 2008.

[12] Abe, T. and Bauch, G., "Differential codebook MIMO precoding technique," *GLOBECOM '07*. IEEE, pp. 3963-3968, Nov. 2007.

[13] Kim, T., Love, D.J., and Clerckx, B.: "MIMO systems with limited rate differential feedback in slowly varying channels," *IEEE Trans. on Commun.*, April 2011, Vol. 59, No. 4, pp. 1175-1189.

[14] R1-105011, WF on 8 Tx codebook, 3GPP TSG RAN WG1 62, Aug. 2010.

[15] IEEE C802.16m-09/0058r3, Differential feedback for IEEE 802.16m MIMO schemes, Jan. 2009.

[16] 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*, pp. 11-18, Jan. 2012

[17] Y. J. Kim, X. Li, T. J. Kim, and D. J. Love, "A combination lock-like differential codebook for temporally correlated channels," *IET Electronics*

*Letters*, Vol. 48, No. 1, pp. 1629-1639, Jan. 2012.

[18] B. C. Banister and J. R. Zeidler, "Feedback assisted transmission subspace tracking for MIMO systems," *IEEE JSAC*, pp. 452-463, Feb. 2003.

[19] J. Yang and D. B. Williams, "Transmission subspace tracking for MIMO systems with low-rate feedback," *IEEE Trans. on Commun.*, pp. 1629-1639, Feb. 2007.

[20] G. H. Golub and C. F. V. Loan, *Matrix Computation*, Johns Hopkins University Press, 3rd ed., 1994.

— 저 자 소 개 —



김 영 주(평생회원)-교신저자  
2001년 2월 한국과학기술원  
박사 졸업  
2001년 1월~2003년 8월 (주)엘지전  
자 UMTS 시스템연구소  
2011년 7월~2012년 7월 Purdue  
Univ. 방문교수  
2003년 9월~현재 충북대학교 전자정보대학 교수  
<주관심분야 : LTE-A, Distributed antenna  
system>



서 창 원(학생회원)  
2014년 충북대학교 정보통신  
공학과 학사 졸업.  
2014년 3월~현재 충북대학교  
정보통신공학과  
석사 과정.

<주관심분야 : 차세대이동통신시스템, LTE-A,  
MIMO>



박 노 윤(학생회원)  
2007년 충북대학교 정보통신  
공학과 학사 졸업.  
2009년 충북대학교 정보통신  
공학과 석사 졸업.  
2009년 3월~현재 충북대학교  
정보통신공학과  
박사 과정.

<주관심분야 : 차세대이동통신시스템, LTE-A,  
MIMO>