

논문 2012-50-4-2

회전로크 구조의 차분 선부호화 기법의 성능 분석

(Performance Analysis of Rotation-lock Differential Precoding Scheme)

김 영 주*

(Young Ju Kim)

요 약

LTE (long term evolution) 및 LTE-A (LTE-Advanced) 시스템에서는 폐회로 기반의 다중 안테나 기술이 적용되었으며, 최대 비 전송 방식 (maximum ratio transmission, MRT) 보다 성능은 감소되지만, 동 이득 (equal gain) 특성을 유지할 수 있는 동 이득 전송 (equal gain transmission, EGT) 코드북을 채택하고 있다. 본 논문에서는 LTE 및 LTE-A 시스템에서 사용되는 코드북보다 성능을 향상시킬 수 있는 차분 코드북을 제안한다. 특히 동 이득 특성을 그대로 유지하면서 LTE 시스템의 코드북 요구조건을 모두 만족시키는 코드북을 제안한다. 코드북을 구성하는 코드워드들의 인자들 (elements)이 8-PSK (phase-shift keying) 성운 (constellation) 만을 사용하므로, 선부호화 및 복호 시 계산량이 낮아지는 LTE 코드북의 장점을 그대로 유지할 수 있다. 동 이득 성질은 특히 상향 링크에서 첨두 전력 대 평균 전력비 (PAPR)에 상당한 영향을 미치므로 매우 중요하다. 본 논문에서는 각 송신 안테나에 동 이득을 유지하는 성질을 이용한 새로운 차분 코드북을 제안하고, 동작원리를 회전 로크 구조로 설명한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 성능 분석에서, 동일한 피드백 비트 수를 갖는 같은 크기의 코드북에서 제안하는 차분 코드북은 기존 LTE 코드북보다 최소 0.9dB 성능 향상을 보인다.

Abstract

Long term evolution (LTE) and LTE-Advanced (LTE-A) systems adopt closed-loop multiple-input multiple-output antenna techniques. Equal gain transmission which has equal gain property is the key factor in their codebook design. In this paper, a novel differential codebook structure which maintains the codebook design requirements of LTE or LTE-A systems. Especially, eight-phase shift keying (8-PSK) constellations are used as elements of codewords, which not only maintain equal gain property but also reduce the computation complexity of precoding and decoding function blocks. The equal gain property is very important to uplink because the performance of uplink is very sensitive to the peak-to-average power ratio (PAPR). Moreover, the operation of the proposed differential codebook is explained as a rotation-lock structure. As the results of computer simulations, the steady-state throughput performance of the proposed codebook shows at least 0.9dB of SNR better than those of the conventional LTE codebook with the same amount of feedback information.

Keywords : Closed-loop MIMO, differential codebook, LTE, LTE-A, equal-gain transmission

I. 서 론

* 평생회원, 충북대학교 전자정보대학 컴퓨터정보통신 연구소

(Research Institute for Computer and Information Communication, College of Electrical & Computer Engineering, Chungbuk National University)

※ 이 논문은 2012학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2012)

접수일자: 2012년12월5일, 수정완료일: 2013년3월22일

Long-term evolution (LTE) 및 LTE-Advanced (LTE-A) 시스템에서는 코드북을 이용하는 폐회로 다중 송수신 안테나 (multiple-input multiple-output) 시스템을 채택하여 빔포밍 이득과 필요한 피드백 정보량 간에 최적의 균형을 유지하고 있다^[1-2]. 배열 이득 (array gain) 으로서 불리는 빔포밍 이득을 얻기 위해서

는 송신부에서 채널 상태 정보(channel state information, CSI)를 미리 알고 있어야, 이상적인 선부호화 과정을 할 수 있다. 주파수 분할 다중(frequency division multi-plexing, FDD) 시스템은 상향링크와 하향링크에서 사용하는 주파수가 다르므로, 만약 하향링크를 고려한다면, 수신부에서 하향링크의 채널 상태 정보를 송신부로 피드백 해주어야 한다. 그러나 피드백 채널은 매우 제한될 수밖에 없으므로, 이를 위해 ‘제한된 피드백 시스템 (limited feedback system)’에 대한 연구가 수행되었다^[3-5].

최근 LTE-A 시스템에서 코드북을 적용한 성능 향상을 목적으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 이중(dual) 코드북 기법 중의 한 가지인 차분 코드북 기법에 대해 많은 연구가 수행 중에 있다. 실제적인 무선 채널은 매우 빠른 속도로 변하지 않고, 상대적으로 천천히 변하게 되므로 인접한 시간 (또는 channel use, 채널사용)에서 항상 시간 상관성이 존재한다. 차분 코드북은 채널의 시간 상관성을 고려하여 무선 채널 공간의 전체를 양자화하는 기존 코드북 설계 기법에 비해, 왜곡을 상당히 최소화 시키는 기법이다^[6]. 이 기법은 다른 이중 코드북 기법과 비교하여 코드북 내 인덱스를 추가로 피드백 하지 않으므로, 제한된 피드백 채널을 효율적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 시간 상관을 고려한 무선 채널을 1차 가우스-마르코프 체인 (Gauss-Markov chain) 으로 모델링하여 시스템 용량에 대한 자세한 연구가 이루어졌으며, 특히 실제적인 구현 방법으로 적응 코드북을 사용하는 부공간 추적 (subspace tracking) 기법, 통계적으로 작은 변화 (stochastic perturbation)를 주는 방법으로 최소의 피드백 비트 (최소 1비트 피드백)를 이용한 부공간 추적 기법^[7], 이를 확장하여 Grassmannian 다면체 (manifold, 공간) 상의 측지선 (geodesic) 이용하는 방법^[8], 그리고 벡터 양자화 기법 및 채널 부공간의 일부분을 구면체의 일부 면 (spherical cap) 기반의 다양한 super-codeset을 활용하는 기법 등이다^[9]. 기존에 연구된 차분 코드북 기법으로는 평균 상호 정보량 (mutual information)을 활용하기 위해 준-대각 (quasi-diagonal) 단위행렬을 이용하거나, 차분 회전 성질을 이용한 실시간 적응형 구조 및 구면 캡 (spherical cap) 방식의 설계 기법 등에 대해 연구되었다^[6, 10-11]. 이와 같은 차분 코드북 설계 기법은 최대 비 전송 방식을 기반으로 하는데, 침투 전력 대 평균 전

력비 (peak-to-average ratio, PAPR)의 증가, 비선형증폭기 사용에 따른 효율 저하 등의 문제가 발생된다^[12].

한편, 동 이득 전송 방식을 사용한 차분 코드북은 각 송신 안테나의 파워를 제한하기 때문에 PAPR을 감소시키는 효과를 가져 온다^[13]. 또한, 최대 비 전송 방식의 코드북에 비해 이론적인 성능이 약간 감소하지만, 비선형 증폭기를 사용하는 실제 시스템에서는 최대 비 전송 방식보다 우수한 성능을 얻을 수 있다. 따라서 현재 LTE-A 시스템의 코드북은 동 이득 전송 성질을 갖는다.

본 논문에서는 기존 차분 코드북과는 달리 8-PSK 성운을 코드워드의 인자 (element)로 하여 동 이득 성질을 갖는 새로운 차분 코드북을 제안하고, 1차 가우스-마르코프 채널 모델에서 차분 코드북 송수신 시스템의 성능을 분석한다. 또한, 차분 코드북 구조를 회전 로크의 동작으로 설명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델을 소개한다. III장에서는 기존 코드북과 차분 코드북 생성 및 설계 기법을 설명한다. IV장에서는 시뮬레이션 결과를 분석한다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결론을 서술한다.

II. 시스템 모델

LTE 혹은 LTE-A 시스템의 하향링크에서 폐회로 다중 송수신 안테나 시스템을 적용한다고 가정한다. 송신 안테나 수를 M_t , 수신 안테나 수를 M_r , 그리고 송신부의 전송 스트림 수를 M_s 라고 정의한다. 이때 시스템 모델을 단순화하기 위해 $M_r = M_s = 1$ 이라 한다. 하향링크에서 수신 단말은 송신부인 기지국에 비해 매우 소형 경량이므로 본 논문에서는 수신 안테나를 2개 이상 설치하기 용이하지 않다고 가정한다. 그러나 전송 스트림 수 및 수신 안테나 수가 2보다 큰 경우에 대해서도 제안하는 차분 코드북의 생성 및 적용은 가능하다. 그림 1은 단일 계층 (single stream)의 데이터 신호를 전송하는 폐회로 MISO 시스템의 블록도이다. B 비트의 피드백을 한다고 가정할 때, 송수신부는 $N = 2^B$ 크기의 동일한 코드북을 공유한다. 코드북 $W_k = \{w_k^1, \dots, w_k^N\}$ 에서 k 는 채널 구현 인덱스 (channel realization index) 또는 시간 스텝 (time

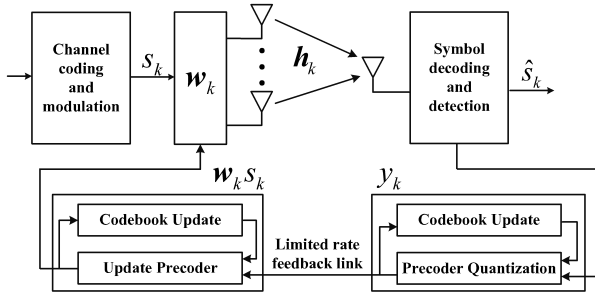


그림 1. 제한된 차분 피드백 시스템의 블록도
Fig. 1. Block diagram for proposed limited rate differential feedback system.

instant)이며 $w_k^n \in C^{M_t \times 1}$, $n = 1, \dots, N$ 은 W_k 의 n 번째 코드워드를 의미하고, $C^{a \times b}$ 는 $a \times b$ 복소수 행렬을 의미한다. 수신부에서 이상적인 채널 추정을 가정하고 주어진 (또는 설계된) 코드북의 코드워드들 중에서 채널 용량을 최대화하는 코드워드를 선택하고 그 인덱스 (B 비트) 만을 송신부로 피드백한다. 송신부는 수신된 인덱스를 이용하여 선부호화를 한다. 단일 계층 신호의 수신 신호 y_k 는 아래와 같이 표현된다.

$$y_k = \sqrt{\rho} h_k^H w_k s_k + z_k. \quad (1)$$

이때 $h_k \in C^{M_r \times 1}$ 은 k 번째 채널 시간에서의 채널 벡터를 의미하며, h_k 의 M_r 개의 인자는 서로 독립이며 동일한 분포를 (independent and identically distributed, i.i.d.) 갖는 평균은 0이고 분산은 1인 복소 가우시안 확률 분포이다. 잡음 항 z_k 는 가산성 백색 가우시안 (additive White Gaussian, AWG) 분포를 가지며, 평균은 0이고 분산 σ^2 은 잡음 신호의 전력 (power)이다. ρ 값은 수신 신호의 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)를 $1/\sigma^2$ 로 정규화 할 수 있도록 결정한다. 또는 ρ 를 수신 신호의 신호 대 잡음비 (SNR) 이라 정하고 $h_k^H w_k s_k$ 및 z_k 의 전력을 1로 정규화 할 수도 있다. 한편, 시간 상관성 채널은 아래 식에 의한 1차 가우스-마르코프 체인 모델을 가정한다.

$$h_k = \epsilon h_{k-1} + \sqrt{1-\epsilon^2} g_k. \quad (2)$$

$g_k \in C^{M_r \times 1}$ 은 시간 k 에서 평균이 0이고 분산이 1인 서로 독립적이고 동일한 분포를 갖는 (independent and identically distributed, i.i.d.) 새로운 비상관성 레일리 플

랫 페이딩 채널 벡터이다. ϵ ($0 \leq \epsilon \leq 1$)는 채널 상관 계수로서 인접한 채널 h_{k-1} 와 h_k 벡터 간의 상관성을 나타낸다. 모든 h_k 는 동일한 ϵ 값을 갖는다고 가정한다. 채널 상관 계수는 $\epsilon = J_0(2\pi f_D T)$ 로 Jakes 모델을 따른다 [14]. 이때, $J_0(\cdot)$ 는 0차 베셀 함수, T 는 시간 스텝 주기 (또는 간격, channel instantiation interval), 그리고 $f_D = v f_c / c$ 는 단말기 속도 v , 반송 주파수 f_c , 그리고 $c = 3 \times 10^8 m/s$ 로 계산되는 최대 도플러 주파수이다.

III. 회전 로크 구조의 차분 선부호화 시스템

차분 코드북의 동작은 다음과 같다. 매 시간 k 마다 송신부와 수신부에서는 아래 식에 의해 이전 시간인 $k-1$ 에서 결정된 빔포밍 벡터 w_{k-1} 과 제안하는 코드북 W_{diff} 의 각 코드워드들과의 곱에 현재 시간 k 의 새로운 코드북이 생성된다. 이때, 각 코드워드들과의 곱은 아래와 같다.

$$W_k = \langle W_{diff} \cdot w_{k-1} \rangle. \quad (3)$$

이때, $\langle \cdot \rangle$ 는 코드북의 각 코드워드들과 빔포밍 벡터 w_{k-1} 의 인자 간 (element by element) 곱이며, 각 시간 스텝 k 에서 새로운 코드북 W_k 를 생성한다. 이때, 각 코드워드와 빔포밍 벡터의 내적 (inner product, 內積)으로 구하면 각 코드워드와의 곱은 상수(常數) 값이 되어 코드북이 되지 않음에 주의해야 한다. 그리고 초기 코드북 즉 $k=1$ 의 경우는 기존의 코드북을 이용하고 $k=2$ 부터 차분 코드북을 적용한 차분 선부호화를 한다.

식 (3)의 코드북은 수신부 및 송신부에서 동일하게 업데이트되어야 한다. 수신부에서는 하향링크 채널, h_k 를 추정하고 이 값을 이용하여 최적의 선부호 (precoder) w_k 를 코드북 W_k 에서 선택한다. 코드북 내 N 개의 인덱스 중 시간 스텝 k 에서 최적의 인덱스 n_{opt} 는 다음 식과 같이 채널 용량 (channel capacity)를 최대화 하도록 선택할 수 있다.

$$n_{opt} = \arg \max_n \log_2(1 + \rho h_k^H w_k^n). \quad (4)$$

이때 채널 용량 C 는 아래 식과 같다.

$$C = \log_2(1 + \rho h_k^H w_k). \quad (5)$$

또 다른 선부호 선택 방법으로는 수신 신호 대 잡음비 (singal-to-noise ratio, SNR)를 최대화 하는 선부호 (precoder) \mathbf{w}_k 를 코드북 W_k 에서 선택하는 것이다.

$$n_{opt} = \arg \max_n \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k^n. \quad (6)$$

잡음신호의 분산이 σ^2 일 때, 수신 신호 대 잡음비 γ 는 다음 식과 같다.

$$\gamma = \frac{\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k}{\sigma^2}. \quad (7)$$

제안하는 코드북을 회전로크 구조라고 명명한 이유는 제 IV장에서 설계되는 차분 코드북이 8-PSK 성운만을 인자로 하고 있으며, 식 (3)의 동작이 마치 회전로크의 동작과 같기 때문이다. 예를 들어 시간 스텝 $k-1$ 에서 $\mathbf{w}_{k-1} = [1, e^{-j\pi/4}, 1, e^{j\pi/4}]$ 가 선택되었다면, 시간 스텝 k 에서의 차분 코드북 W_k 는 W_{diff} 의 각 코드워드에 \mathbf{w}_{k-1} 의 인자 간 곱으로 구해지므로, W_{diff} 의 한 코드워드 $[1, 1, 1, 1]$ 은 \mathbf{w}_{k-1} 와 인자 간 곱이 되어 $[1, e^{-j\pi/4}, 1, e^{j\pi/4}]$ 이 된다. 이때 회전로크의 두 번째, 네 번째 인자가 각각 양의 방향으로 $\pi/4$ 와 음의 방향으로 $\pi/4$ 로 회전된 것으로 보인다. W_{diff} 의 다른 코드워드들도 모두 마찬가지로 회전로크의 두 번째, 네 번째 인자가 각각 양의 방향으로 $\pi/4$ 와 음의 방향으로 $\pi/4$ 로 동시에 회전된 것이 된다. 그림 2에 8-PSK 성운의 코드북 동작 원리를 보인다. 그림 2의 첫 번째 행의 성운도를 보면 W_{diff} 의 $[1, 1, 1, 1]$ 코드워드가 $\mathbf{w}_{k-1} = [1, e^{-j\pi/4}, 1, e^{j\pi/4}]$ 의 코드워드회전되어 있음을 알 수 있다. 다른 코드워드들도 모두 같은 방향으로 회전되어 W_k 을 이루게 된다.

IV. 회전 로크 구조의 차분 코드북 설계

제안하는 차분 코드북에서는 선부호화 벡터 \mathbf{w}_k 의 인자가 아래의 8-PSK 성운의 집합 M 에 속한다고 가정한다.

$$M = \left\{ \frac{1}{\sqrt{M_t}} e^{j\pi k/4}, k = 0, 1, \dots, 7 \right\}. \quad (8)$$

LTE release-8 코드북에서도 8-PSK 성운의 인자로 코

드북을 설계하여 일정 계수 특성 (constant modulus property) 및 선부호화 및 복호화의 복잡도를 경감시키고 있으므로, 제안하는 차분 코드북은 LTE 코드북 설계 조건을 완벽하게 만족시키게 된다.

차분 코드북이 아닌 경우 전체 코드북 설계는 채널 벡터가 가질 수 있는 전체 공간 (channel matrix ball)을 Grassmannian 빔포밍 기법 또는 랜덤 벡터 양자화 기법 등을 이용하여 특정 코드북 사이즈로 양자화하여 구한다^[15]. 양자화된 코드워드들은 전체 공간에서 등방성 분포 (isotropically distribution)를 가지므로, 코드북 크기가 증가하면 양자화 밀도가 증가하게 되어 양자화 왜곡은 감소하지만 피드백 정보량은 증가된다.

폐회로 선부호화 방식은 차량의 이동속도가 50 km/hr 이상에서는 채널 정보가 빠르게 변하므로, 채널 정보 (CSI)를 피드백하여 선부호화를 적용할 때 충분한 성능 향상을 얻을 수 없고, 전혀 다른 채널 정보로 선부호화할 수도 있어 시스템이 무용화될 수도 있다. 채널 상황이 저속 환경일 경우는 채널 정보를 피드백 받아 거의 수신된 채널 정보와 거의 동일한 채널 정보로 선부호화를 할 수 있으므로 시스템의 성능 향상 정도가 크다.

차분 코드북은 무선 채널이 천천히 변하는 특성을 이용하여 채널 벡터의 전체 공간을 양자화하지 않고 채널 변화에 따른 일부분의 구면 캡 영역만을 양자화 하여, 동일한 크기의 코드북을 지속적으로 업데이트함으로 채널 벡터의 전체 공간의 양자화 밀도를 획기적으로 높이는 효과를 얻을 수 있다.

기존의 차분 코드북 설계는 채널 변화를 섭동 또는 측지선 기법으로 추정하며, 코드워드 알파벳에 대한 제한이 없다. 제안하는 차분 코드북은 코드워드 알파벳에 8-PSK 성운만을 사용하는 것으로 차분 코드북 $W_{diff} = \{\mathbf{w}^1, \mathbf{w}^2, \dots, \mathbf{w}^N\}$ 에서 $\mathbf{w}^n \in C^{M_t \times 1}$, $n = 1, \dots, N$ 은 코드북에서 n 번째 코드워드를 의미한다. 코드북 설계 문제는 이와 같은 제한과 주어진 시간 상판 ϵ 에서 채널 용량을 최대로 하는 코드북을 찾는 문제가 된다. 시간 스텝 k 의 코드북은 식 (3)에 의해 업데이트된다. 채널이 변하지 않는 경우를 W_{diff} 의 코드워드에 반영하여, $\mathbf{w}^1 = [1, 1, \dots, 1]^T$ 을 중심으로 차분 코드북 W_{diff} 을 설계한다. 또한 각 코드워드에서 첫 번째 송신 안테나에 해당하는 인자를 1로 지정한다. 이것은 일반

표 1. 사용하는 성운 수에 따른 후보 코드북 경우의 수

Table 1. The number of candidate codebook according to the using constellation.

성운 수 (K)	코드워드 경우의 수 ($K^3 - 1$)	후보 코드북 경우의 수 $\binom{K^3 - 1}{15}$
3	27 - 1	7,726,160
5	125 - 1	7.977×10^{18}
7	343 - 1	$\gg 10^{30}$
8	512 - 1	

적인 선부호화 과정의 회전 불변성 (rotation invariance) 특성을 적용한 것으로 코드북 인덱스 내 각 코드워드에서 첫 번째 안테나의 인자를 1이 되도록 회전 시킨 양을 나머지 코드워드에 적용하여 회전시켜도 선부호화 과정의 특성은 변하지 않는 성질을 이용한 것이다.

하기에는 송신 안테나 수 $M_t = 4$, 코드북 크기 $N = 16$ 인 예제를 이용하여 제안하는 차분 코드북의 설계 방법을 설명한다. 먼저 상기에서 설명한 바와 같이 \mathbf{w}^1 과 각 코드워드 내 첫 번째 송신 안테나에 해당하는 인자가 결정되었으므로, 나머지 코드워드들은 $(N - 1 = 15) \times (M_t - 1 = 3) = 45$ 개의 코드워드 인자들을 결정하면 된다. 이때 8-PSK 성운을 모두 사용하거나, $1, e^{j\pi/4}, e^{-j\pi/4}$ 등 3개만 사용할 수도 있다. 사용하는 성운 수에 따른 후보 코드북의 가지 수는 표 1과 같다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 성운 수는 $1, e^{j\pi/4}, e^{-j\pi/4}$ 등 3 개를 이용하거나, $1, e^{j\pi/4}, e^{-j\pi/4}, e^{j\pi/2}, e^{-j\pi/2}$ 등 5 개를 이용하면 충분하다. 그 이상의 성운을 사용하는 경우는 성능 개선이 없으며, 후보 코드북의 가지 수도 매우 큰 값이어서 실제적인 컴퓨터 시뮬레이션으로 얻을 수 없다. 특히 $\epsilon = 0.8$ 이상의 경우에는 3 개의 성운으로도 충분한 채널 용량을 얻을 수 있어, 코드북 설계 시간을 획기적으로 줄이는 효과도 얻을 수 있다.

8-PSK 성운이 코드북 W_{diff} 의 각 코드워드의 3개 인자로 결정될 수 있는 모든 후보 코드북이 설정되면, 동일한 시간 상관 계수 ϵ 값을 갖는 수많은 채널을 발생시킨 후 이 채널들에 대해 채널 용량 C 를 최대화하는 하나의 후보 코드북을 차분 코드북으로 결정함으로써 설계가 종료된다. 생성된 차분 코드북을 표 2에 나타낸다.

표 2. 제안하는 차분 코드북

Table 2. Proposed differential codebook.

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

V. 회전 로크 차분 코드북의 성능 분석

제안하는 차분 코드북을 적용한 폐회로 다중 안테나 시스템의 성능을 Monte-Carlo 모의실험을 통해 분석하였다. 시스템 모델에서 채널은 시간 상관성 및 주파수 非상관 채널을 가정하며, 차분 선부호화 시스템의 성능 분석에서 초기

코드북은 제안하는 코드북과 같이 8-PSK 성운을 이용하여 설계된 LTE 코드북을 사용한다. 표 3은 모의실험을 위한 여러 가지 가정 및 파라미터를 정리한 것이다. 송신 및 수신 안테나 수는 각각 4개 1개를 가정하고, 코드북 크기 $N = 16$ 으로 LTE release-8 시스템과 동일하게 한다. 1차 가우스-마르코프 프로세스의 ϵ 값은 반송파 주파수 2.5GHz , 단말기 이동 속도 3km/hr , 피드백 시간 간격 5ms 에서 파장 $\lambda = c/f_c = 3 \times 10^8 / 2 \times 10^9 = 0.15\text{m}$ 을 구하고, 도플러 주파수 $f_D = v/\lambda = 3\text{km/hr}/0.15\text{m} = 5.55\text{Hz}$ 를 구한 다음 $\epsilon = J_0(2\pi f_D T) = 0.988$ 과 같이 구할 수 있다^[11].

Monte Carlo 시뮬레이션으로 제안하는 기법의 채널 당 시간 스텝에 따른 용량과 정상 상태 (steady state) 채널 용량 (channel capacity or achievable throughput)

표 3. 성능 분석용 시뮬레이션 파라미터
Table 3. Simulation parameters for performance analysis.

Parameters	Value
Carrier frequency	2.5 GHz
Channel	1차 Makov
Antenna configuration (M_t, M_r)	(4, 1)
Modulation	QPSK
Channel estimation	Ideal
Time correlation coefficient (ϵ)	0.988

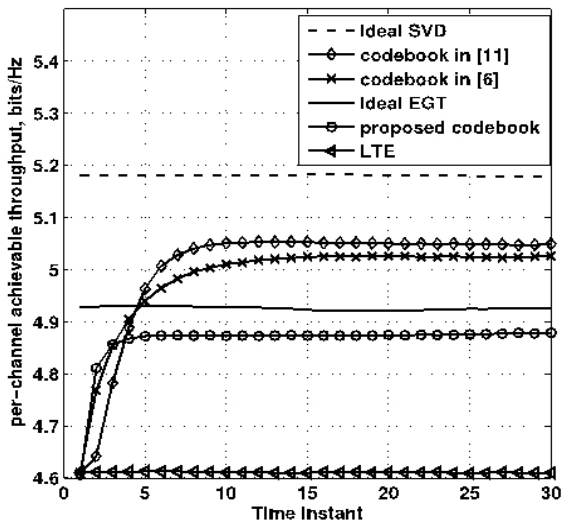


그림 3. 다양한 차분 코드북에서 각 시간 인덱스의 채널 용량에 따른 성능 비교

Fig. 3. Per-time instance achievable throughput performance of various differential codebook schemes.

을 구한다. 그림 3은 시간 스텝에 따른 채널 용량의 변화를 볼 수 있다. 이때, 신호 대 잡음비는 10dB 로 고정한다. 점선으로 그려진 제일 위쪽의 기법부터, 이상적인 SVD기법의 최대 비 전송 (MRT) 기법, [11]의 차분 코드북, [6]의 차분 코드북, 이상적인 동 이득 전송 (EGT) 기법, 제안하는 차분 코드북, 그리고 LTE release-8 코드북의 성능을 보인다. [6], [11]에서 제시된 차분 코드북은 최대 비 전송 특징을 갖기 때문에 동 이득 전송을 특징으로 하는 제안하는 LTE 코드북과 제안하는 차분 코드북보다 성능이 우수하다. 하지만, 서론에서 기술한 바와 같이 동 이득 전송 방식은 최대 비 전송 방식의 코드북에 비해 이론적인 성능이 약간 감소하지만 PAPR 감소 및 비선형 증폭기를 사용하는 실제 시스템에서 최대 비 전송 방식보다 우수한 성능을 얻는다. 제안하는 코드북은 LTE 코드북에 비해 우수한 성능을 보인다. 더욱이 8-PSK 성운만을 코드북 인자로 가정으로 구현 복잡도가 작을 뿐만 아니라 정상 상태 성능으로 빠르게 수렴함을 알 수 있다. 그림 4는 신호 대 잡음비에 따른 채널 당 정상 상태 채널 용량을 보인다. 점선으로 표시된 제일 위쪽의 성능 곡선부터 이상적인 최대 비 전송 기법, [11]의 코드북, [6]의 코드북, 제안하는 차분 코드북, 그리고 LTE release-8 코드북의 성능을 보인다. 제안하는 코드북은 LTE 코드북에 비해 신호 대 잡음비가 10dB 에서 0.9dB 의 신호대 잡음비

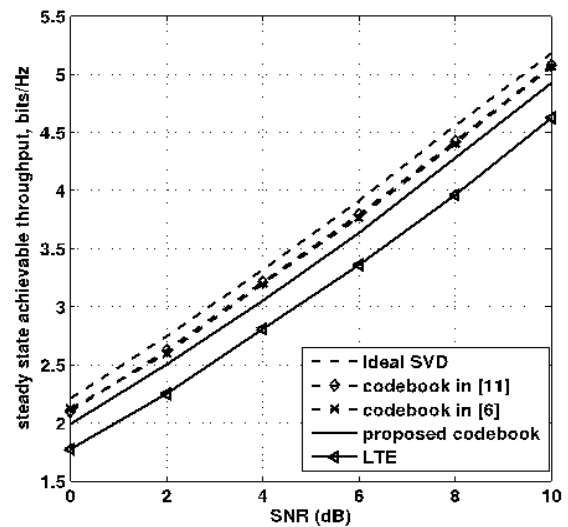


그림 4. 다양한 차분 코드북에서 SNR 당 정상상태의 채널 용량에 따른 성능 비교

Fig. 4. Steady state achievable throughput performance of various differential codebook schemes.

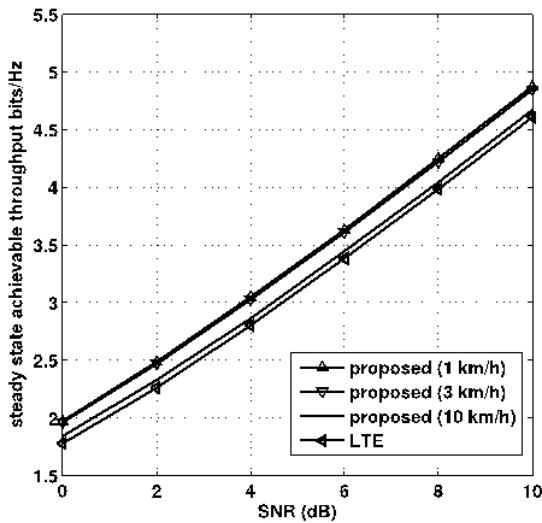


그림 5. 단말기 이동 속도 변화에 따른 SNR 당 정상상태의 채널 용량 성능 비교

Fig. 5. Steady state achievable throughput performance of various mobile speed.

이득을 얻음을 볼 수 있다. 시간 상관 계수 ϵ 이 0.999 (1km/hr)에서 0.872 (10km/hr)로 변화할 경우에도 LTE 코드북보다 향상된 성능 곡선을 얻음을 그림 5에 나타낸다.

VI. 결 론

본 논문에서는 동 이득 전송 특성을 유지하는 새로운 차분 선부호화 기법에 적합한 차분 코드북을 처음으로 제안하였다. 특히 8-PSK 성운만을 코드북의 인자로 사용함으로써 기존 LTE release-8의 코드북 설계조건을 완벽히 충족하므로, 송수신부의 선부호화기 관련 구조의 복잡도를 낮출 뿐만 아니라, 코드북 설계를 빠르게 할 수 있다. 채널 당 정상상태의 용량도 LTE 시스템의 코드북 보다 약 0.9dB 성능 개선이 됨을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 36.211 - *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 9.1.0)*, Mar. 2010.
[2] D. J. Love, R. W. Heath, Jr., V. K. N. Lau, D. Gesbert, B. D. Rao, and M. Andrews, "An overview of limited feedback in wireless communication

systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 26, no. 8, pp. 1341 - 1365, Oct. 2008.
[3] 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.
[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] 김상구, 이신, 김영주, "LTE-Advanced 시스템의 선부호화된 상향 링크 성능 분석," 대한전자공학회 논문지, 제48권 TC편 제5호, 418-425쪽, 5월 2011.
[6] T. Abe and G. Bauch, "Differential codebook mimo precoding technique," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. GLOBECOM' 07*, pp. 3963-3968, 2007.
[7] B. Banister and J. Zeidler, "Feedback assisted transmission subspace tracking for MIMO systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 452-463, Apr. 2003.
[8] J. Yang and D. Williams, "Transmission subspace tracking for MIMO systems with low rate feedback," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 8, pp. 1629-1639, Aug. 2007.
[9] B. Mondal and R.W.Heath, "Channel adaptive quantization for limited feedback MIMO beam-forming system," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 54, no. 12, pp. 4717-4729, Dec. 2006.
[10] T. J. Kim, D. J. Love, B. Clerckx, and S. J. Kim, "Differential rotation feedback mimo system for temporally correlated channels," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. IEEE GLOBECOM 2008*, pp. 1-5, 2008.
[11] T. J. Kim, D. J. Love, and B. Clerckx, "Mimo systems with limited rate differential feedback in slowly varying channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 4, pp. 1175-1189, Apr. 2011.
[12] C.-p. Liang, J.-H. Jong, W. E. Stark, and J. R. East, "Nonlinear amplifier effects in communications systems," *IEEE Trans. Microw. theory Tech.*, vol. 47, no. 8, pp. 1461-1466, Aug. 1999.
[13] C. R. Murthy and B. D. Rao, "Quantization methods for equal gain transmission with finite rate feedback," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 1, pp. 233-245, Jan. 2007.
[14] William C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, IEEE Press, 1993.
[15] J. Zheng, E. R. Duni, and B. D. Rao, "Analysis of multiple-antenna systems with finite-rate feedback using high resolution quantization

theory," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55,
no. 4, pp. 1461-1476, Apr. 2007.

— 저 자 소 개 —



김 영 주(평생회원)

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>