

LTE 하향 링크 중계기 시스템에서 새로운 하이브리드 코드북 성능 분석

Performance Analysis of A Hybrid Codebook for LTE Downlink Relay Systems

김 형 준 · 박 노 윤 · 김 영 주*

Hyung-Jun Kim · Noe-Yoon Park · Young-Ju Kim*

요 약

본 논문에서는 레일리 분포를 가지는 DFT 행렬 기반의 코드북에 LOS용 코드북을 라이시안 페이딩 채널에서 최소 거리를 최대화하는 조건에 맞게 결합, 새로운 하이브리드 코드북 설계 방법을 제안한다. 제안하는 코드북을 LTE 하향 링크 시스템에 적용, 기존의 DFT 행렬을 이용한 코드북과 제안하는 하이브리드 코드북의 성능을 분석한다. 하이브리드 코드북은 K 값이 0.28~0.99인 경우, 가장 우수한 성능을 보이면서 레일리 페이딩 채널 및 LOS 성분이 강해지는 모든 경우에서 우수한 성능을 보인다.

Abstract

In this paper, we propose a novel hybrid codebook design method which combines DFT matrix based codebook for Rayleigh fading and LOS codebook for direct path. Link-level performances employing hybrid codebook outperform the ones employing the conventional codebooks when K -factor of Rician distribution is 0.28 to 0.99. Moreover hybrid codebook shows good performances over not only Rayleigh channel but also high K 's Rician channels.

Key words : Relay, LTE, Codebook, Line-of-sight, MIMO

I. 서 론

3rd generation partnership project(3GPP) 표준화 회의에서 제안한 long term evolution(LTE)은 2004년에 처음으로 논의를 시작하였다. 2009년 release 8, 9 버전이 완성되었으며, 최근 LTE를 발전시키는 LTE release 10 버전은 LTE-Advanced(LTE-A) 시스템이란 이름으로 표준화 논의가 진행되고 있다^{[1]~[5]}.

LTE 하향 링크 시스템은 전송 다이버시티 이득 및 어레이 이득을 얻기 위해 선부호화(precoding) 기

법을 채택한다. 이때 송신단은 수신단으로부터 채널 정보를 피드백(feedback) 받아야 한다^[6]. 피드백 정보는 채널 랭크(rank) 및 안테나 수, 그리고 사용자 수 증가에 비례해서 증가하므로 시스템에 오버헤드로 작용한다. 이를 해결하기 위해 실제 시스템에서는 코드북(codebook)이라 정의된 양자화된 채널 벡터들의 집합을 이용한다^[7].

기존의 코드북을 구성하는 양자화된 채널 벡터는 주로 레일리 분포의 페이딩 채널을 가정하여 설계되었다. 최근에는 LTE-A 시스템에서 중계기가 중요한

「이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2009-0074737).」

충북대학교 정보통신공학과(School of Information & Communication Engineering, Chungbuk National University)

*충북대학교 전자정보대학(College of Electrical & Computer Engineering, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20101215-173

· 교신저자 : 김영주(e-mail : yjkim@cbnu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 4월 5일

이슈가 되면서 line-of-sight(LOS) 성분을 갖는 라이시안(Rician) 페이딩용 코드북의 연구가 필요하게 되었다. 특히 LTE-A 시스템에서 중계기(relay)를 이용한 협력 통신이 구현될 경우 기지국과 중계기 간의 무선 링크인 백홀 링크(backhaul link)에서는 라이시안 페이딩 채널을 반드시 고려해야 한다.

본 논문에서는 레일리 분포를 가지는 DFT 행렬 기반의 코드북에 LOS 성분을 라이시안 페이딩 채널에서 최소 거리(minimum distance)를 최대화하는 조건에 맞게 결합, 새로운 하이브리드 코드북 설계 방법을 제안한다. 제안하는 코드북을 LTE 하향 링크 시스템에 적용, Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 심벌 에러율(Symbol Error Rate: SER)을 측정하여 기존 DFT 코드북과 제안하는 코드북의 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 중계기를 고려한 LTE 하향 링크 시스템에서 라이시안 페이딩 채널 모델과 선부호화 기법에 대해 설명하고, III장에서는 제안하는 하이브리드 코드북의 설계 방법을 상세히 설명하며, IV장에서 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 제안하는 코드북의 성능을 분석한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2-1 라이시안 MIMO 채널

그림 1은 데이터를 송신하는 기지국(Base Station: BS)과 데이터를 수신하는 단말기(User Equipment: UE), 그리고 기지국과 단말기를 사이에서 통신에 관여하는 중계기로 구성된 중계 채널 모델이다. 하나의 단말기와 통신하기 위해 사용할 수 있는 중계기가 여러 개인 환경에서는 중계기를 쉘 영역을 확장하는 역할뿐 아니라 데이터 전송률을 높이는 용도로 활용할 수 있다. 이때, 중계기는 amplify and forward (AF) 기법과 decode and forward (DF) 기법이 주로 사용된다^{[8]~[11]}.

중계기를 이용한 송수신 시스템에서 기지국과 중계기 간 채널인 백홀 링크는 중계기와 단말 간의 무선 링크인 액세스 링크(access link)에 비해 상대적으로 라이시안 페이딩 채널로 생각할 수 있다. 라이시안 페이딩 채널 \mathbf{H} 는 식 (1)에 의해 정의된다^[12].

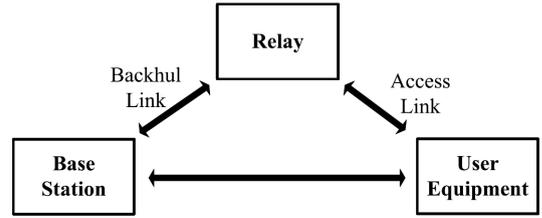


그림 1. 중계 채널 모델
Fig. 1. Relay channel model.

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \mathbf{H}_{LOS} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{H}_{NLOS} \quad (1)$$

이때, K 는 라이시안 페이딩의 특성을 결정하는 변수로서 '0'부터 '∞'의 값을 가진다. \mathbf{H}_{LOS} , \mathbf{H}_{NLOS} 는 각각 LOS 환경과 Non-LOS 환경에서의 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 채널 행렬을 의미한다. 라이시안 페이딩의 특성상 K 가 작은 값을 가질 경우, 레일리 분포에 근접하며, 큰 값을 가질 경우 레일리 분포 성분은 사라진다. 일반적으로 그림 2의 MIMO 어레이 파면도(波面圖)를 고려했을 때, \mathbf{H}_{LOS} 는 식 (2)에 의해 정의된다^[13].

$$\mathbf{H}_{LOS} = \begin{bmatrix} e^{j\theta} & e^{j2\theta} & \dots & e^{jM_T\theta} \\ e^{j2\theta} & e^{j4\theta} & \dots & e^{j2M_T\theta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{jM_R\theta} & e^{j2M_R\theta} & \dots & e^{jM_T M_R\theta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{2\pi d \cos\Theta}{\lambda} = 2\pi \Delta \cos\Theta \quad (3)$$

여기서 M_T 는 송신 안테나 수, M_R 는 수신 안테나 수이고, θ 는 수신단의 신호 입사 각도를 의미한다. d 는 수신 안테나 사이의 간격이고, λ 는 반송파 파장이다.

2-2 레일리 페이딩 채널용 코드북 선부호화 기법

랭크 값이 1인 폐회로 방식을 통한 MIMO 시스템에서 송신 신호 s 는 선부호화 행렬 $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_{M_T}]^T$ 와 곱해진 후 송신된다. 송신 신호와 수신 신호의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{w}s + \mathbf{v} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{H} 는 $M_R \times M_T$ 크기를 갖는 채널 행렬이며,

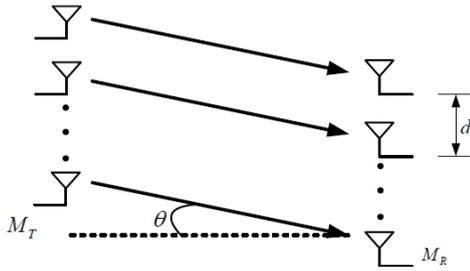


그림 2. MIMO 어레이에서 파면도
Fig. 2. Wavefront impinging across MIMO array.

$\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_{M_R}]^T$ 는 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 잡음 성분이다. 이때, 송신단에서 완벽한 채널 정보를 획득하기가 어렵기 때문에 실제로는 대표 채널 정보들로 구성되어 있는 코드북을 송수신단에서 활용한다. 코드북은 Grassmannian packing 기법 등으로 생성되며, 코드북의 크기가 L 일 때 레일리 분포를 가지는 DFT 행렬 기반의 코드북은 식 (5)와 같다^[14].

$$\mathbf{F} = \{ \mathbf{w}_{\text{DFT}}, \boldsymbol{\theta} \mathbf{w}_{\text{DFT}}, \dots, \boldsymbol{\theta}^{L-1} \mathbf{w}_{\text{DFT}} \}^T \quad (5)$$

\mathbf{w}_{DFT} 는 $M_T \times M_T$ 의 크기를 갖는 DFT 행렬에서 특정 길이로 선택된 벡터이고, $\boldsymbol{\theta}$ 는 각 인덱스에 곱해지는 코드북 생성 변수이며, 식 (6)과 같다.

$$\boldsymbol{\theta} = \text{diag}([e^{j2\pi u_1/N}, e^{j2\pi u_2/N}, \dots, e^{j2\pi u_{N_T}/N}]) \quad (6)$$

여기서 $u_1 \dots u_{N_T}$ 는 $0 \leq u_1 \dots u_{N_T} \leq L-1$ 을 만족하는 임의의 상수이다. 이때, L 은 코드북의 크기이다.

M_T 가 2일 때 LTE에서는 L 이 4, WiMAX에서는 8인 코드북을 사용하고, M_T 가 4일 때 LTE에서는 L 이 16, WiMAX에서는 8 또는 64인 코드북을 사용한다^{[2][15]}.

2-3 LOS 채널용 코드북

LOS 성분 코드북은 동일 거리 기준에 의해 식 (7)과 같이 나타낼 수 있고, 동일 거리 기준은 벡터 공간에서 코드워드 사이에 최소거리를 최대화 하기 위하여 두 개의 인접한 코드워드 사이의 각도 차이는 동일해야 한다. 여기서 각도 차이는 두 개의 코드워드 벡터 $\mathbf{w}(\theta_1)$ 과 $\mathbf{w}(\theta_2)$ 의 $|\theta_1 - \theta_2|$ 값이다^[13].

$$\mathbf{w}_k = \sqrt{N_T} [e^{-j\theta_k}, e^{-j2\theta_k}, \dots, e^{-jN_T\theta_k}] \quad (7)$$

이때 $k=1, 2, \dots, L$ 이다. LOS 성분 코드북은 M_T 가

4일 경우 L 이 8 이상이 되면 이상적인 페루프 시스템의 성능에 근접하게 된다.

III. 하이브리드 코드북 생성 방법

본 논문에서 제안하는 하이브리드 코드북은 송신 안테나 수가 4개일 때, 식 (7)에 나타나 있는 LOS 성분과 식 (5)에 나타나 있는 DFT 행렬의 결합을 통해 생성된다. 그림 3은 제안하는 코드북 설계 방법을 정리한 것이며, 상세한 설계 방법은 다음과 같다.

- 1) LOS 성분과의 결합을 위한 DFT 행렬 기반 코드북의 크기(L_{DFT})를 지정한다. 발생 가능한 L_{DFT} 는 $L_{\text{DFT}} \in L, (L=4, 8, 16, 32, 64)$ 조건을 만족한다. 이때, $L_{\text{DFT}} \geq 8$ 부터 미비한 성능 차이만을 보이므로 크기를 8로 지정한다.
- 2) DFT 행렬 기반 코드북과의 결합을 위한 LOS 성분의 코드북 크기(L_{LOS})를 지정한다. 발생 가능한 L_{LOS} 는 $L_{\text{LOS}} \in L (L=4, 8, 16, 32, 64)$ 조건을 만족한다. 이때, $L_{\text{LOS}} \geq 8$ 부터 미비한 성능 차이만을 보이므로 크기를 8로 지정한다.
- 3) 1), 2)에서는 코드북 생성 특성에 따라 생성된 코드워드 중 1개의 중복된 코드워드가 존재한다. 중복된 코드워드를 제거할 경우 n bits로 구성된 전체 코드북 크기 $2^n (n=1, 2, \dots)$ 을 만족하지 못해 효율성이 저하되는 문제점이 발생한다. 이를 해결하기 위해 1)에서 $L_{\text{DFT}}=9$ 가 되도록 크기를 재지정한 후, 2)에서 중복되는 코드북의 코드워드를 제거한다.
- 4) 1)에서 선정된 DFT 기반 코드북 길이에서 생성될 수 있는 가능한 코드북을 모두 생성한다. 생성된 코드북에 2)에서 선정된 LOS 성분 코드북을 전위나 후위에 결합한다. 이때 피드백 채널에 오류가 없다고 가정할 경우, 채널 상태에 따른 코드북의 인덱스 피드백에 있어서 코드북의 순서는 성능에 영향을 미치지 않으므로 1)에서 선정된 코드북에 2)에서 선정된 코드북을 포함하여 배치해도 성능에 영향을 미치지 않는다.
- 5) 결합된 코드북들의 Grassmann manifold에 속한 부분 공간의 상대 거리를 chordal distance라 하는데, 식 (8)과 같이 나타낸다^[7].

```

C_DFT : DFT codebook
DFT[i] : hybrid codebook 내에 DFT codebook 집합
(i : codebook 길이가  $L_{DFT}$ 만큼의 발생 가능한 codebook 수)
 $L_{DFT}$  : DFT[i]의 길이
C_los : LOS codebook
los : hybrid codebook 내에 LOS codebook
hyb[i] : i만큼의 hybrid codebook 집합
hyb : Last hybrid codebook
case : C_DFT로부터 9개의 코드워드를 선택할 경우의 수

Step 1. Set DFT codebook length
while 1
for i = 1:  $L_{DFT}$ 
    {if length(DFT[i]) < length(C_DFT)
        { $x_r$  = compare performance(DFT[i], C_DFT);
        {if  $x_r > \text{threshold}_{\text{value}}$ 
            {break;}}
    }
Step 2. Set LOS codebook length
while 1
    {if length(los) < length(C_los)
        { $x_l$  = compare performance(los, C_los);
        {if  $x_l > \text{threshold}_{\text{value}}$ 
            {break;}}
    }
Step 3. Remove same codeword
for iter0 = 1:length(DFT[i])
    {for iter1 = 1:length(los)
        {if DFT[i](iter0) = los(iter1)
            {cnt = cnt+1;
            delete(DFT[i](iter0));}}
length(DFT[i]) = length(DFT[i]) + cnt;
Step 4. Combine DFT and LOS codebook
for i = 1: case
    {hyb[i] = [DFT[i]; los]}
Step 5. Calculate chordal distance
for iter2 = 1:length(hyb[i])
    {for iter3 = 1:hyb[k]-1
        {for iter4 = iter+1:hyb[k]
            {cnt1 = cnt1+1;
            chordal_dist[cnt1] = sqrt(1-abs(hyb[k](iter3)
                * hyb[k](iter4)^2);}}
    min_dist(iter2) = min(chordal_dist);}
[hyb_max, hyb_index] = max(min_dist);
hyb = hyb[k](hyb_index);
    
```

그림 3. 하이브리드 코드북 설계 방법
Fig. 3. Design method of the hybrid codebook.

표 1. 제안하는 하이브리드 코드북
Table 1. Proposed hybrid codebook.

Index	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4
0	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
1	0.3830 +0.3214i	0.0868 +0.4924i	0.3830 -0.3214i	-0.2500 -0.4330i
2	0.0868 +0.4924i	-0.4698 +0.1710i	0.0868 -0.4924i	-0.2500 +0.4330i
3	-0.2500 +0.4330i	-0.2500 -0.4330i	-0.2500 -0.4330i	0.5000 -0.0000i
4	-0.4698 +0.1710i	0.3830 -0.3214i	-0.4698 -0.1710i	-0.2500 -0.4330i
5	-0.4698 -0.1710i	0.3830 +0.3214i	-0.4698 +0.1710i	-0.2500 +0.4330i
6	-0.2500 -0.4330i	-0.2500 +0.4330i	-0.2500 +0.4330i	0.5000 -0.0000i
7	0.0868 -0.4924i	-0.4698 -0.1710i	0.0868 +0.4924i	-0.2500 -0.4330i
8	0.3830 -0.3214i	0.0868 -0.4924i	0.3830 +0.3214i	-0.2500 +0.4330i
9	0.5000	0.3536 +0.3536i	0.0000 +0.5000i	-0.3536 +0.3536i
10	0.5000	0.0000 +0.5000i	-0.5000 +0.0000i	-0.0000 -0.5000i
11	0.5000	-0.3536 +0.3536i	-0.0000 -0.5000i	0.3536 +0.3536i
12	0.5000	-0.5000 +0.0000i	0.5000 -0.0000i	-0.5000 +0.0000i
13	0.5000	-0.3536 -0.3536i	0.0000 +0.5000i	0.3536 -0.3536i
14	0.5000	-0.0000 -0.5000i	-0.5000 +0.0000i	0.0000 +0.5000i
15	0.5000	0.3536 -0.3536i	-0.0000 -0.5000i	-0.3536 -0.3536i

$$p(w_k w_l) = \sqrt{1 - |w_k w_l|^2} \quad (8)$$

여기서 w_k 와 w_l 은 서로 다른 코드워드를 나타낸다. 제안하는 하이브리드 코드북(W)은 chordal distance를 이용하여 식 (9)에 의해 결정된다.

$$W = \underset{W \in \text{set of codebooks}}{\operatorname{argmax}} \left\{ \min_{w_k \neq w_l \in W} p(w_k w_l) \right\} \quad (9)$$

상기 방법에 의해 생성된 전체 인덱스 수가 16인 하이브리드 코드북을 표 1에 나타낸다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 하이브리드 코드북의 성능을 확인하기 위해 DFT 코드북과 참고문헌 [13]에서 제안한 이상적인 LOS 기반 코드북을 LTE 하향 링크 기반 MIMO-OFDM 시스템에 적용, 라이시안 K 값을 변화시키면서 SER 성능 추정을 통해 그 성능을 분석하였다.

표 2는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 위한 여러 가지 가정 및 LTE 기반의 파라미터를 정리한 것이다. 채널 추정(channel estimation) 및 동기화(synchronization)는 이상적이라고 가정하며, 송신 안테나 환경은 비상관 안테나(uncorrelated antenna)라고 가정하며, 잡음은 CN ($0, N_0$)의 분포를 가지는 AWGN을 이용한다. 다중 경로 채널을 위한 power delay profile(PDP)는 ITU-R 모델의 Pedestrian A를 이용하였다^[16].

그림 4는 LTE 하향 링크 시스템에서 K 값이 '0'일 때 수신 안테나 수를 변경하면서 성능을 나타낸 것으로 제안하는 하이브리드 코드북은 $SER=10^{-3}$ 에서 LOS 기반 코드북보다 수신 안테나 수가 1인 경우는 0.2 dB, 2인 경우는 0.3 dB, 그리고 4인 경우는 0.4 dB 정도 성능이 향상됨을 보인다.

그림 5는 LTE 하향 링크 시스템에서 K 값이 '4'일

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters.

Parameters	Values
Modulation / Demodulation	16-QAM
FFT / IFFT size	512
Cyclic prefix configuration	Nomal
Number of transmit antenna	4
Number of receive antenna	1, 2, 4
Rank	1
Channel bandwidth [MHz]	5
Sampling time [ns]	130
Rician K -factor	0, 4, 8
Channel model	ITU-R(Pedestrian A)
Number of multi-path	3
Relative delay [ns]	0, 110, 190
Average power [dB]	0, -9.7, -19.21
Feedback bits	4

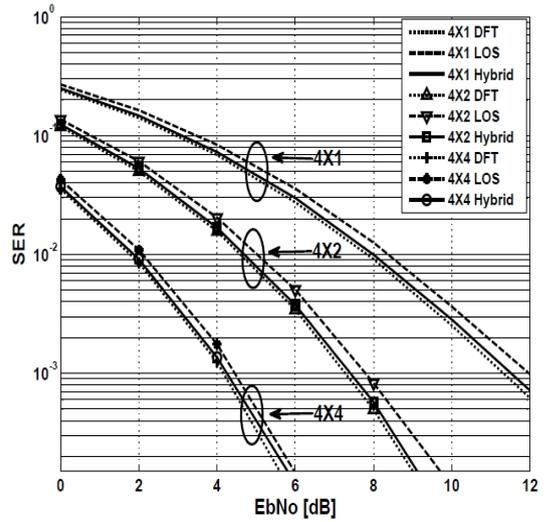


그림 4. K 값이 0인 경우 하이브리드 코드북을 이용한 SER 성능 비교($M_T=4, M_R=1, 2, 4$)
Fig. 4. Comparison of SER performance of hybrid codebook for K -factor 0 ($M_T=4, M_R=1, 2, 4$).

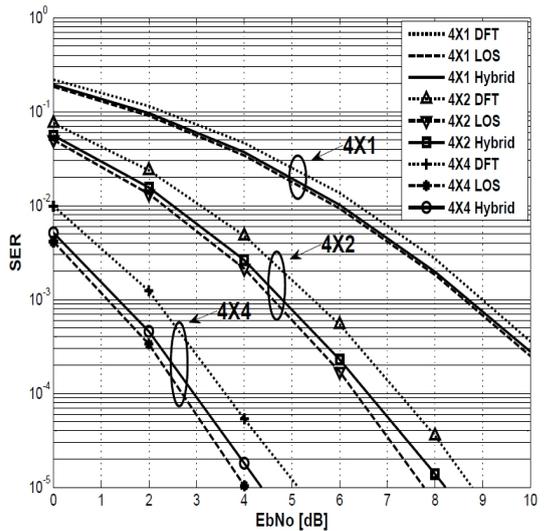


그림 5. K 값이 4인 경우 하이브리드 코드북을 이용한 SER 성능 비교($M_T=4, M_R=1, 2, 4$)
Fig. 5. Comparison of SER performance of hybrid codebook for K -factor 4 ($M_T=4, M_R=1, 2, 4$).

때 수신 안테나 수를 변경하면서 성능을 나타낸 것으로 제안하는 하이브리드 코드북은 $SER=10^{-3}$ 에서 DFT 행렬 기반 코드북보다 수신 안테나 수가 1인 경우는 0.2 dB, 2인 경우는 0.6 dB, 그리고 4인 경우는 0.7 dB 정도 성능이 향상됨을 보인다.

그림 6은 그림 4, 5와 동일한 시뮬레이션 환경에서 K 값이 '8'일 때 수신 안테나 수를 변경하면서 성능을 나타낸 것으로 제안하는 하이브리드 코드북은 $SER=10^{-3}$ 에서 DFT 행렬 기반 코드북보다 수신 안테나 수가 1인 경우는 0.7 dB, 2인 경우는 0.8 dB, 그리고 4인 경우는 0.9 dB 정도 성능이 향상됨을 보인다.

그림 5, 6에서 K 값이 증가할수록 제안하는 하이브리드 코드북과 DFT 행렬 기반 코드북의 성능 차이가 점점 커지는 것을 확인한다.

그림 7은 DFT 행렬 기반 코드북, 참고문헌 [13]에서 제안한 이상적인 LOS 코드북, 그리고 본 논문에서 제안하는 하이브리드 코드북에 대해 수신 안테나 수가 4인 경우 $SER=10^{-3}$ 일 때 K 값의 증가에 따른 E_bN_o [dB]를 나타낸다. 이상적인 LOS 코드북은 DFT 행렬 기반 코드북보다 K 값이 0.56인 지점에서부터 더 좋은 성능을 보이며, K 값이 0.28부터 0.99인 지점에서는 제안하는 하이브리드 코드북이 DFT 행렬 기반 코드북과 LOS 코드북보다 가장 좋은 성능을 보인다. 하이브리드 코드북은 $0.28 < K < 0.99$ 범위에 적합하게 설계되어 있음을 알 수 있다. 따라서 $K > 0.99$ 인 경우, LOS 코드북의 성능이 더 우수한 성능을 보

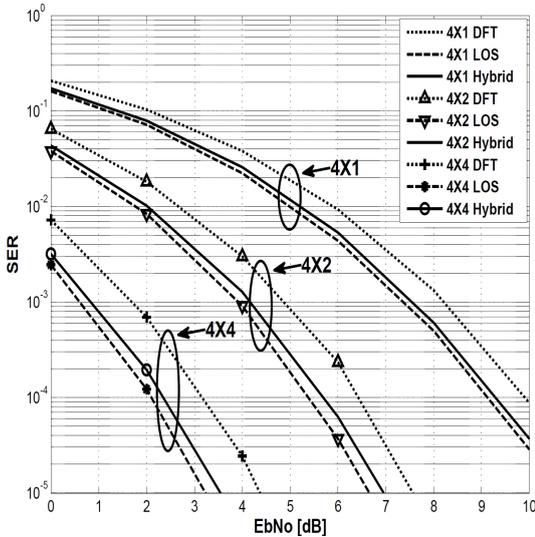


그림 6. K 값이 8인 경우 하이브리드 코드북을 이용한 SER 성능 비교 ($M_T=4, M_R=1, 2, 4$)

Fig. 6. Comparison of SER performance of hybrid codebook for K -factor 8 ($M_T=4, M_R=1, 2, 4$).

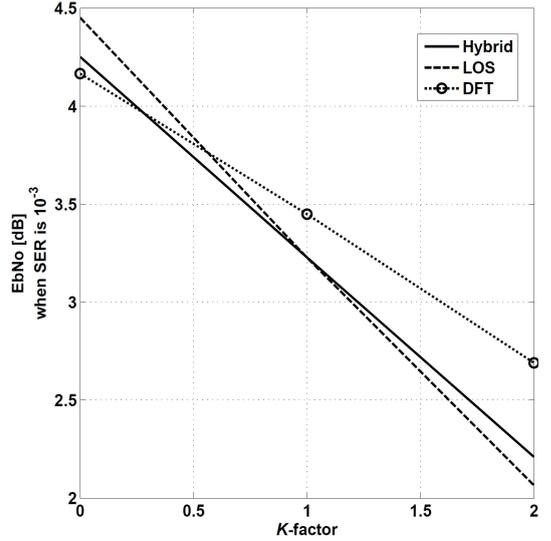


그림 7. SER 이 10^{-3} 일 때 K 값에 따른 E_bN_o 비교 ($M_T=4, M_R=4$)

Fig. 7. Comparison of performance by K -factor when SER is 10^{-3} ($M_T=4, M_R=4$).

인다. 하지만 실제 실제 채널 상에는 레일리 페이딩 성분과 LOS 성분이 같이 존재하기 때문에 실제 채널에 가까운 라이시안 채널에 적합하도록 설계한 하이브리드 코드북의 사용이 적합하다.

V. 결 론

본 논문에서는 송신 안테나 수가 4개이고, 송신 다이버시티 이득을 얻는 LTE 하향 링크 시스템에서 레일리 분포를 가지는 DFT 행렬 기반의 코드북에 LOS 성분을 라이시안 페이딩 채널에서 최소 거리를 최대화하는 조건에 맞게 결합하는 새로운 하이브리드 코드북 설계 방법을 제안하였다. Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 제안하는 하이브리드 코드북의 성능이 기존 DFT 행렬 기반 코드북보다 라이시안 K -factor가 증가함에 따라 그 성능이 우수함을 증명하였다. LOS를 고려한 라이시안 페이딩 채널에서 제안하는 코드북이 선부호화 기법을 적용한 중계기 시스템에 적용된다면 보다 우수한 링크 레벨 성능 획득 및 이동 통신 시스템의 영역 및 용량 증가 효과를 가져올 것이다.

참 고 문 헌

[1] 3rd Generation Partnership Project, <http://www/3->

- gpp/org
- [2] 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 36.211 - *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA); Physical Channels and Modulation(Release 8)*, Dec. 2010.
- [3] 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TR 25.913 - *Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA(E-UTRA) and Evolved UTRAN(E-UTRAN)(Release 8)*, Dec. 2008.
- [4] International Telecommunication Union-Radio communications, M.2134 - *Requirements Related to Technical Performance for IMT-Advanced Radio Interface(s)*, Dec. 2008.
- [5] 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TR 36.913 - *Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Further Advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA) (LTE-Advanced)(Release 9)*, Dec. 2009.
- [6] Titus K. Y. LO, "Maximum ratio transmission", *IEEE Trans. on Comm. Theory*, vol. 47, no. 10, pp. 1458-1461, Oct. 1999.
- [7] D. J. Love, R. W. Heath, and T. Strohmer, "Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems", *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2735-2747, Oct. 2003.
- [8] E. Meulen, "Three-terminal communication channels", *Adv. Appl. Prob.*, vol. 3, pp. 120-154, Spr. 1971.
- [9] T. Cover, A. E. Gamal, "Capacity theorems for the relay channel", *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 25, no. 5, pp. 572-584, Sep. 1979.
- [10] T. Cover, J. Thomas, *Elements of Information Theory*, New York: Wiley, 1991.
- [11] J. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [12] Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar and Dhanajay Gore, *Introduction to Space-time Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2003.
- [13] Joontae Kim, Ding-Jo Park, "Constrained codebook design for a MISO beamforming system in a rician channel", in *Proceedings of the 69th IEEE VTC'09*, Barcelona, Spain, Jun. 2009.
- [14] B. M. Hochwald, T. L. Marzetta, T. J. Richardson, W. Sweldens, and R. Urbanke, "Systematic design of unitary space-time constellations", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 10, pp. 1962-1973, Sep. 2000.
- [15] WiMAX 802.16e - *Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*, Feb. 2006.
- [16] Recommendation ITU-R M. 1225, *Guidelines for Evolution of Radio Transmission Technologies for IMT-2000*, 1997.

김 형 준



2009년 2월: 배재대학교 정보통신
공학과 (공학사)
2009년 9월~현재: 충북대학교 정보
통신공학과 석사과정
[주 관심분야] Relay, LTE, WiMAX,
MIMO, OFDM 등

김 영 주



1988년 2월: 고려대학교 전자전산
공학과 (공학사)
1996년 2월: 한국과학기술원 정보
통신공학과 (공학석사)
2001년 2월: 한국과학기술원 전기
및 전자공학화 (공학박사)
1987년 11월~1993년 12월: (주)금
성사
1996년 2월~1997년 2월: 동경공업대학교 연구원
2001년 1월~2003년 8월: (주)엘지전자 UMTS 연구원
2003년 8월~현재: 충북대학교 전자정보대학 정보통신
공학과 교수
[주 관심분야] 차세대 이동 통신 시스템, LTE, LTE-Advan-
ced, 중계기, MIMO 등

박 노 윤



2007년 2월: 충북대학교 정보통신
공학과 (공학사)
2009년 2월: 충북대학교 정보통신
공학과 (공학석사)
2009년 3월~현재: 충북대학교 정보
통신공학과 박사과정
[주 관심분야] LTE, LTE-Advanced,
MIMO, OFDM 등