

SSLNR 기반의 ZF-THP를 위한 새로운 빔형성 기법

조용석*, 변윤식^o

New Beamforming Technique for ZF-THP Based on SSLNR

Yong-seock Cho*, Youn-shik Byun^o

요 약

본 논문에서는 협력 빔형성(Coordinated Multi-Point Coordinated Beamforming : CoMP CB) 시나리오에서 인접한 사용자들 때문에 발생하는 간섭(Inter User Interference : IUI)을 제거하기 위해 사용된 Block Diagonal Geometric Mean Decomposition(BD-GMD)기반의 IUI 제거 알고리즘을 Successive Signal to Leakage plus Noise Ratio(SSLNR) 환경에서의 ZF(Zero-Forcing)에 적용하여 누출 전력을 제거한다. 또 IUI 제거 알고리즘을 사용했을 시 문제가 되는 원하는 신호 전력(Desired signal power)의 크기를 크게 보장할 수 없다는 점을 보완하기 위해 적절한 채널 열 순열(Channel ordering)을 수행하여 원하는 신호의 전력을 높인다. IUI 제거 알고리즘 사용과 적절한 채널 열 순열을 통해 기존의 SSLNR-Zero-Forcing Tomlinson Harashima precoding(ZF-THP) 기법보다 더 나은 비트오류확률(Bit Error Rate : BER)성능을 낼 수 있다.

Key Words : Coordinated multiple-point transmission/reception, Successive Signal to Leakage plus Noise Ratio, Inter User Interference, Zero-Forcing Tomlinson Harashima Precoding

ABSTRACT

In this paper, Inter user interference elimination algorithm based on Block Diagonal Geometric Mean Decomposition(BD-GMD) for eliminating inter user interference apply to Zero-Forcing in the Successive Signal to Leakage plus Noise Ratio(SSLNR) in Coordinated Multi-Point Coordinated Beamforming system(CoMP CB). As a result, the leakage power is eliminated. The inter user interference elimination algorithm, however, cannot guarantee the enough desired signal power therefore we perform the channel ordering to overcome this disadvantage and increase the desired signal power. The simulation results show that the proposed scheme provides the improved Bit Error Rate(BER) performance compared with existing SSLNR-Zero-Forcing-Tomlinson Harashima precoding(SSLNR-ZF-THP).

I. 서 론

현대 사회에서 모바일 통신의 중요성 점점 커지고 있다. 2010년부터 모바일 기기 사용자는 50억 명을 넘었으며 세계적으로 한 해의 모바일 수익은 곧 1조 달러에 이를 것이다¹⁾. 하지만 모바일 사용자가 늘어남에 따라 증가되는 데이터량을 감당하기

위한 방법이 필요하다. WiMax와 Long Term Evolution(LTE)에 채택된 Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) 시스템은 송수신단에 다중의 안테나를 설치하여 데이터 throughput을 높일 수 있기 때문에 이동통신 시스템에서 중요한 이슈가 되어 왔다. 하지만 Multi User(MU) 시스템에서 주파수 재사용률을 1로 함으로써 모든 사용자가 같은 시

* 주저자 : 인천대학교 통신신호처리 연구실, cjswoakf86@naver.com, 학생회원

^o 교신저자 : 인천대학교 통신신호처리 연구실, buyn@incheon.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2012-12-562, 접수일자 : 2012년 12월 11일, 최종논문접수일자 : 2013년 3월 26일

간 슬롯과 같은 주파수 스펙트럼을 사용함에 따라 수신단에서 Co Channel Interference(CCI)가 발생된다^[2]. 이를 해결하기 위해 기지국 간의 협력을 통한 기법 연구가 이루어지고 있으며 이를 Coordinated multiple-point transmission/reception(CoMP)라 한다.

Broadcast 채널 환경에서의 빔형성 기법들에는 선형 Zero-Forcing, Minimum Mean Square Error(MMSE) [3], Coordinated Tx-Rx [4]등이 있다. Tomlinson Harashima Precoding(THP) 시스템을 이용한 기법에는 Block Diagonal Geometric Mean Decomposition(BD-GMD) THP [5], 정사영된 채널 Dirty Paper Coding(DPC) 기반의 THP [6], 그리고 Successive Signal to Leakage plus Noise Ratio(SSLNR) 환경에서의 Zero-Forcing-THP, Minimum Mean Square Error-THP [7] 등이 있다. [7]의 SSLNR-ZF-THP는 이미 알고 있는 누출에 대해서는 DPC로 제거 한 환경에서의 ZF-THP를 수행했으며 SLNR 최대화 기법을 SSLNR 환경에 적용해 비트오류확률 (Bit Error Rate : BER) 성능 향상을 보였다. 하지만 누출 전력을 완화시킬 수는 있지만 제거할 수 없기 때문에 성능의 저하가 있다.

본 논문은 [5]에서 소개된 BD-GMD 기반의 인접 사용자들에 의해 발생하는 간섭 (Inter User Interference : IUI) 제거 알고리즘을 [7]의 SSLNR-ZF-THP에 적용하여 누출 전력을 제거한다. 또 IUI제거 알고리즘을 SSLNR-ZF-THP에 적용했을 때 문제가 되는 원하는 신호 전력의 크기를 크게 보장할 수 없다는 문제를 해결하기 위해 채널 열순열 (Channel ordering) 기법을 수행하여 모든 SNR 구간에서 기존의 SSLNR-ZF-THP 기법보다 더 나은 BER 성능을 얻을 수 있다. 여기서 열 순열이란 채널 열을 적절하게 교환하여 나열한다는 의미이다.

본 논문은 II장에서 시스템 모델 및 기존 기법을 소개하고 III장에서 제안하는 기법을 설명한다. IV장에서는 제안된 기법과 기존 기법의 BER 성능 및 Achievable Sum-Rate 성능을 비교 평가한 후 V장에서 결론을 맺는다.

본 논문은 다음과 같은 수식 기호를 사용하도록 한다. $\mathbf{A}^T, \mathbf{A}^H$ 는 각각 행렬의 transpose, conjugate transpose이며 $tr(\bullet), \|\bullet\|$ 는 각각 trace, norm이다. \mathbf{I} 는 단위행렬이며 \mathbf{A}_k 는 행렬 집합 $\{\mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_k\}$ 의 k 번째 행렬을 나타낸다. $\mathbf{A}_{(i,j)}$ 는 \mathbf{A} 의 i 행

j 열의 성분 값을 나타내며 $\mathbf{A}_{(i,:)}$ $\mathbf{A}_{(:,j)}$ 는 각각 \mathbf{A} 의 i 번째 행, \mathbf{A} 의 j 번째 열이다. $L(\mathbf{A})$ 은 \mathbf{A} 의 하부 삼각 행렬을 나타낸다.

II. 시스템 모델 및 SSLNR-ZF-THP

2.1. 시스템 모델

기지국이 K 명의 사용자와 통신하는 Broadcast 하향링크 다중 사용자 환경을 고려한다. 기지국은 N_T 개의 송신 안테나를 가지고 있고 각각의 사용자는 r 개의 수신 안테나를 가지며 모든 사용자의 안테나 수의 합은 다음과 같이 표현된다.

$$N_R = \sum_{k=1}^K r_k \quad (1)$$

\mathbf{s}_k 는 $r \times 1$ 크기의 k 번째 사용자에게 전송되는 송신 신호 벡터이며 \mathbf{s}_k 는 $N_T \times r$ 크기의 빔형성 벡터 \mathbf{w}_k 와 곱해진 뒤 모두 더해져 전송 신호 \mathbf{x} 가 된다.

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k \mathbf{s}_k \quad (2)$$

여기서 \mathbf{w}_k 는 정규 직교 벡터이고 k 번째 사용자의 수신 신호는 y_k 이며 크기는 $r \times 1$ 이다. 따라서 모든 사용자에 대한 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{n}$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_K \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_K \end{bmatrix}, \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_K \end{bmatrix} \quad (3)$$

\mathbf{H}_k 는 $r \times N_T$ 크기의 평균이 0이고 분산이 1인 독립적인 복소 가우시안 (Independent complex gaussian zero-mean unit-variance) 채널 행렬이고 n_k

는 $r \times 1$ 크기의 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 가산성 백색 가우시안 잡음 (AWGN : Additive complex white gaussian noise) 벡터이다.

2.2. BD-GMD 기반의 IUI제거 알고리즘

[5]에서 나타난 BD-GMD THP는 기지국이 K 명의 사용자와 통신하는 하향링크 다중 사용자 환경을 고려하며 채널의 BD-GMD, 송신단에서의 DPC 기법, 그리고 THP를 접목시켜 높은 BER 성능을 보일 수 있었다. BD-GMD 알고리즘은 다음과 같은 수학적인 서술을 통해 설명할 수 있다. 채널의 일반적 삼각 분해 (Generalized Triangular Decomposition : GTD)를 이용하여 BD-GMD를 수행하며 채널 행렬 집합 \mathbf{H} 는 GTD를 통해 다음과 같이 \mathbf{P} , \mathbf{L} , \mathbf{Q} 행렬로 분해된다.

$$\mathbf{H} = \mathbf{P}\mathbf{L}\mathbf{Q}^H$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 & 0 \\ L & \mathbf{L}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{Q}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1^H \\ \mathbf{Q}_2^H \end{bmatrix} \quad (4)$$

\mathbf{P}_1 과 \mathbf{P}_2 는 $r \times r$ 크기의 정규 직교 행렬이며 블록 대각화된 형태로 \mathbf{P} 를 구성한다. \mathbf{Q}_1 와 \mathbf{Q}_2 는 $N_T \times r$ 크기의 정규 직교 행렬이며 열 형태로 \mathbf{Q} 를 구성한다. \mathbf{L}_1 , \mathbf{L}_2 는 $r \times r$ 크기의 하부 삼각 행렬이며 L 는 $r \times r$ 크기의 정사각 행렬이다. 식(4)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{P}_1\mathbf{L}_1\mathbf{Q}_1^H$$

$$\mathbf{H}_2 = \mathbf{P}_2\mathbf{L}\mathbf{Q}_1^H + \mathbf{P}_2\mathbf{L}_2\mathbf{Q}_2^H \quad (5)$$

\mathbf{H}_2 를 \mathbf{Q}_1 와 직교하는 평면 위로 정사영 시켜 다음과 같이 $\mathbf{P}_2\mathbf{L}_2\mathbf{Q}_2^H$ 를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{H}_2(\mathbf{I} - \mathbf{Q}_1\mathbf{Q}_1^H) = \mathbf{P}_2\mathbf{L}_2\mathbf{Q}_2^H \quad (6)$$

L 은 식(6)의 \mathbf{H}_2 오른쪽에는 \mathbf{Q}_1 왼쪽에는 \mathbf{P}_2^H 를 곱함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mathbf{P}_2^H\mathbf{H}_2\mathbf{Q}_1 = \mathbf{P}_2^H(\mathbf{P}_2\mathbf{L}\mathbf{Q}_1^H + \mathbf{P}_2\mathbf{L}_2\mathbf{Q}_2^H)\mathbf{Q}_1$$

$$= \mathbf{P}_2^H\mathbf{P}_2\mathbf{L}\mathbf{Q}_1^H\mathbf{Q}_1 + \mathbf{P}_2^H\mathbf{P}_2\mathbf{L}_2\mathbf{Q}_2^H\mathbf{Q}_1$$

$$= L \quad (7)$$

식(7)은 $\mathbf{P}_2^H\mathbf{P}_2 = \mathbf{I}$, $\mathbf{Q}_1^H\mathbf{Q}_1 = \mathbf{I}$ 임으로 L 로 계산되며 $\mathbf{P}_2^H\mathbf{P}_2\mathbf{L}_2\mathbf{Q}_2^H\mathbf{Q}_1$ 은 Null 행렬이 된다. 식(6)에서 \mathbf{H}_2 를 \mathbf{Q}_1 와 직교 하는 평면 위로 정사영 시켰으므로 \mathbf{H}_2 의 GTD로 생성되는 \mathbf{Q}_2 와 \mathbf{H}_1 의 GTD분해로 생성되는 \mathbf{Q}_1 은 서로 직교한다. 따라서 $\mathbf{Q}_2^H\mathbf{Q}_1 = \text{Null}$ 임으로 식(7)의 계산 결과는 L 이 된다. 결과적으로 위 알고리즘을 기반으로 BD-GMD 를 시행하면 식(4)와같이 IUI에 해당 하는 상부 삼각 성분을 Null 행렬로 만들 수 있다.

2.3. 기존의 SSLNR-ZF-THP 및 SSLNR 최
대화 빔형성 벡터

[7]에서 제안된 ZF-THP는 SSLNR이 최대가 되게 하는 빔형성 벡터를 사용해 신호 대 누출 비를 크게 하여 BER 성능을 높인다. k 번째 사용자 j ($k < j < K$) 번째 사용자에게 미치는 누출에 대해서는 송신단에서 DPC 기법을 통해 제거할 수 있기 때문에 제거하지 못하는 누출 채널만을 고려한 SLNR 환경을 SSLNR 이라한다^[7]. SLNR과 SSLNR 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SLNR_k = \frac{\|\mathbf{H}_k\mathbf{Q}_k\|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K \|\mathbf{H}_j\mathbf{Q}_k\|^2 + \mathbf{n}_k\sigma^2}$$

$$SSLNR_k = \frac{\|\mathbf{H}_k\mathbf{Q}_k\|^2}{\sum_{j=1}^{k-1} \|\mathbf{H}_j\mathbf{Q}_k\|^2 + \mathbf{n}_k\sigma^2} \quad (8)$$

SLNR의 누출 전력 식 부분의 j 는 첫 번째 사용자부터 K 번째 사용자까지 k 번째 사용자를 제외한 $K-1$ 명의 사용자에 대해 누출된다. 하지만 SSLNR의 누출 전력 식 부분의 j 는 첫번째 사용자

부터 $k-1$ 번째 사용자에게 대해 누출된다. 따라서 k 번째 사용자에게 대한 SSLNR과 SSLNR기반의 누출 채널은 각각 다음과 같이 표현될 수 있다^[10].

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{H}}_k &= [\mathbf{H}_1^T, \dots, \mathbf{H}_{k-1}^T, \mathbf{H}_{k+1}^T, \dots, \mathbf{H}_K^T] \\ \bar{\mathbf{H}}_k &= [\mathbf{H}_1^T, \mathbf{H}_2^T, \dots, \mathbf{H}_{k-1}^T] \end{aligned} \quad (9)$$

[7]은 식(9)의 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 을 기반으로 다음과 같이 빔형성 벡터를 구한다.

$$\mathbf{Q}_k = \underset{\max \text{ eigval}}{\text{eigvec}} \left(\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k, \bar{\mathbf{H}}_k^H \bar{\mathbf{H}}_k + \sigma^2 \mathbf{I} \right) \quad (10)$$

\mathbf{Q}_k 는 SSLNR을 최대가 되게 하는 빔형성 벡터로 $\text{tr}(\mathbf{Q}_k^H \mathbf{Q}) = r$ 을 만족한다. [7]에서는 다음과 같이 $\mathbf{H}_k \mathbf{Q}_k$ 를 LQ분해하여 ZF-THP를 수행한다.

$$\mathbf{H}_k \mathbf{Q}_k = \mathbf{L}_k \mathbf{F}_k^H \quad (11)$$

\mathbf{L}_k 은 하부 삼각 행렬이고 \mathbf{F}_k 는 정규 직교 행렬이다. 모든 사용자에게 대하여 \mathbf{Q}_k , \mathbf{F}_k , \mathbf{L}_k 을 다시 쓰면 식(12)와 같다.

식(10)에서 구한 \mathbf{Q}_k 는 SSLNR을 최대화 하는 빔형성 벡터로써 \mathbf{H} , \mathbf{Q} , \mathbf{F} 에 의해 생성되는 \mathbf{R} 행렬의 대각 성분의 크기를 크게 하며 상부 삼각 성분의 크기를 작게 한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{H}_K \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_1 \dots \mathbf{Q}_K], \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{F}_K \end{bmatrix} \\ \mathbf{R} &= \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{F} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \mathbf{Q}_1 \mathbf{F}_1 & \dots & \mathbf{H}_1 \mathbf{Q}_k \mathbf{F}_1 & \dots & \mathbf{H}_1 \mathbf{Q}_K \mathbf{F}_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{H}_k \mathbf{Q}_1 \mathbf{F}_k & \dots & \mathbf{H}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{F}_k & \dots & \mathbf{H}_k \mathbf{Q}_K \mathbf{F}_k \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_K \mathbf{Q}_1 \mathbf{F}_K & \dots & \mathbf{H}_K \mathbf{Q}_k \mathbf{F}_K & \dots & \mathbf{H}_K \mathbf{Q}_K \mathbf{F}_K \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{11}^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \mathbf{R}_{KK}^{-1} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = L(\mathbf{TR}) \quad (13)$$

식(13)의 \mathbf{T} 는 대각 행렬로 THP를 통한 이득 행렬이다. \mathbf{B} 는 $\mathbf{T} \times \mathbf{R}$ 행렬의 하부 삼각 행렬을 나타내며 그림1과 같이 피드백된다. [7]은 이미 알고 있는 누출에 대해서는 DPC로 제거한 환경을 고려하기 때문에 \mathbf{R} 의 대각 성분과 상부 삼각 성분의 값이 성능을 결정한다.

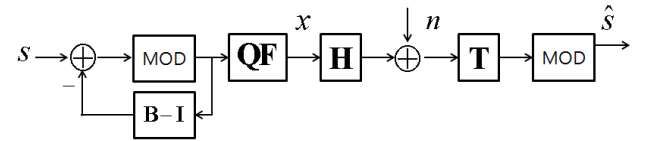


그림 1. LQ 분해 기반의 SSLNR-ZF-THP 시스템
Fig. 1. LQ decomposition based SSLNR-ZF-THP system

III. 제안하는 SSLNR-ZF-THP 기법

본 논문은 N_T 개의 안테나를 가진 기지국과 K 명의 사용자가 각각 $r=1$ 개의 수신 안테나를 가지고 있는 Broadcast 하향링크 환경을 고려한다. II-2에서의 IUI제거 알고리즘을 II-3에 맞게 적용하여 ZF-THP의 누출 전력을 제거한다. 또 IUI 제거 알고리즘을 사용함으로써 원하는 신호 전력의 크기를 크게 보장할 수 없다는 문제를 해결하기 위해 적절한 채널 열 순열 기법을 수행한다. 이로써 기존의 SSLNR-ZF-THP보다 누출 전력의 크기를 줄일 수 있으며 크게 보장 받지 못했던 원하는 신호 전력의 크기를 높일 수 있다.

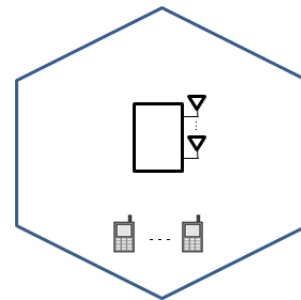


그림 2. 빔형성 기법을 위한 셀 모델
Fig. 2. Cell model for beamforming technique

본 논문에서는 그림2와 같이 [7]에서 사용된 셀 모델을 기반으로 식을 전개해 간다. k 번째 사용자에 대한 행렬, 그리고 k 번째 사용자에 대한 누출 채널을 각각 $\mathbf{H}_k, \bar{\mathbf{H}}_k$ 라 표현한다. 또한 [8][9]에서 사용된 SSLNR 최대화 빔형성 벡터를 SSLNR 환경에 적용하여 만든 식(14)를 SSLNR 최대화 빔형성 벡터라한다.

$$\mathbf{Q}_k = \underset{\max \text{ eigval}}{\text{eigvec}} \left((\bar{\mathbf{H}}_k^H \bar{\mathbf{H}}_k + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \right)$$

$$\text{subject to. } \text{tr}(\mathbf{Q}_k^H \mathbf{Q}_k) = r \quad (14)$$

제안 하는 기법은 채널 열 순열 기법을 포함 하며 다음 절차를 통해 얻을 수 있다.

$$\bar{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_1^T, \mathbf{H}_2^T, \dots, \mathbf{H}_{k-1}^T] \quad (15)$$

식(15)과 같이 SSLNR 기반의 k 번째 사용자에 대한 누출 채널을 생성한다.

$$\bar{\mathbf{H}}_k = \bar{\mathbf{U}}_k \bar{\mathbf{D}}_k \bar{\mathbf{V}}_k^H \quad (16)$$

$$\mathbf{H}_{\perp k} = \mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H) \quad (17)$$

k 번째 사용자 채널을 누출 채널과 직교하는 평면 위로 정사영 시키기 위해 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 을 특이값 분해 (Singular Value Decomposition : SVD)하여 얻은 $\bar{\mathbf{V}}_k$ 의 열벡터들 중 특이값이 가장 큰 벡터 순서대로 $k-1$ 개를 골라 \mathbf{V}_k 라 하고 식(17)과 같이 \mathbf{H}_k 를 \mathbf{V}_k 와 직교하는 평면 위로 정사영 시켜 $\mathbf{H}_{\perp k}$ 을 생성한다. $\mathbf{H}_{\perp k}$ 은 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 와 직교 하는 행렬이 되며 $\mathbf{H}_{\perp k}$ 을 SVD해서 생기는 오른쪽 정규 직교 행렬 중 특이값이 큰 순서대로 r 개의 열을 선택 하여 빔형성 벡터 \mathbf{Q}_k 를 얻을 수 있다. \mathbf{Q}_k 는 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 와 직교하기 때문에 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 을 제거할 수 있는 빔형성 벡터가 된다. 하지만 $\bar{\mathbf{H}}_k$ 와 직교하는 \mathbf{Q}_k 는 \mathbf{H}_k 와 얼마나 큰 상관성을 가지고 있을지 보장 할 수 없

음으로 k 사용자에 대한 신호 전력을 크게 보장 할 수 없다. 여기서 각각의 k 사용자에 대한 신호 전력을 원하는 신호의 전력이라 한다. 본 논문에서는 \mathbf{H}_k 의 열을 교환함으로써 $\mathbf{H}_{\perp k}$ 와 \mathbf{H}_k 의 상관성을 높일 수 있다. 서로의 상관성을 높인다는 것은 $\mathbf{H}_{\perp k}$ 를 SVD하여 생성되는 빔형성 벡터가 원하는 신호의 전력을 더욱 높일 수 있다는 것을 의미한다. 제안하는 채널 열 순열 기법은 식(19)를 최대한 만족하도록 수행한다.

$$\mathbf{H}_{\perp k} = \mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H) \quad (18)$$

$$\|\mathbf{H}_k\| \approx \max \left(\left\| \mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H) \right\| \right) \quad (19)$$

식(18)과 같이 $\mathbf{H}_{\perp k}$ 가 만약 $\mathbf{H}_{\perp k} = \mathbf{H}_k$ 라면 채널 \mathbf{H}_k 를 누출 채널과 직교하는 평면 위로 정사영 한 행렬 $\mathbf{H}_{\perp k}$ 가 \mathbf{H}_k 이 된다는 뜻이다. 즉, $\mathbf{H}_{\perp k}$ 를 SVD하여 생성되는 빔형성 벡터를 \mathbf{Q}_k 라고 하면 이는 \mathbf{H}_k 를 SVD하여 생성되는 벡터와 같기 때문에 $\|\mathbf{H}_k \mathbf{Q}_k\| = \|\mathbf{H}_k\|$ 을 만족하는 빔형성 벡터인 동시에 누출 채널을 제거할 수 있는 이상적인 벡터가 된다. 따라서 norm값을 기준으로 최대한 $\|\mathbf{H}_{\perp k}\| \approx \|\mathbf{H}_k\|$ 이 되도록, 즉, 식(19)를 달성하도록 채널의 열을 교환한다. 본 논문은 [11]에서 소개된 수정된 QR 분해 (Modified QR Decomposition : MQRD)를 이용하여 표1과 같이 채널의 열을 교환한다. 표1은 원하는 신호 전력을 높이기 위한 제안하는 채널 열 순열 알고리즘이다.

표1의 1)과 같이 $\mathbf{A}, \hat{\mathbf{Q}}, \hat{\mathbf{R}}$ 을 초기화 시킨 뒤 MQRD를 수행한다. 2)는 \mathbf{A} 의 첫 번째 열과 l 번째 열을 교환하기 위한 반복이며 교환 할 수 있는 열의 개수는 N_T 개이다. 3)의 $\mathbf{A}_{l \leftrightarrow l}$ 은 \mathbf{A} 의 첫 번째 열과 l 번째 열을 교환 한다는 뜻이고 열이 교환된 \mathbf{A} 를 $\bar{\mathbf{A}}$ 라 한다. 4)~ 9)까지는 일반적인 MQRD 과정을 나타내며 $\bar{\mathbf{A}}$ 는 $\hat{\mathbf{Q}}_{(:,1)}$ 와

표 1. 제안하는 채널 열 순열 알고리즘 ($r = 1$)
Table 1. Proposed channel ordering algorithm ($r = 1$).

1) $\mathbf{A} = \mathbf{H}_k$
$\dot{\mathbf{Q}} = \text{zeros}, \dot{\mathbf{R}} = \text{zeros}$
2) iter : $l = 1 : N_T$
3) $\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_{1 \leftrightarrow l}$
4) $\dot{\mathbf{R}}_{(1,1)} = \ \bar{\mathbf{A}}_{(:,1)}\ $
5) $\dot{\mathbf{Q}}_{(:,1)} = \frac{\bar{\mathbf{A}}_{(:,1)}}{\dot{\mathbf{R}}_{(1,1)}}, \bar{\mathbf{A}}_{(:,1)} = 0$
6) iter : $j = 2 : N_T$
7) $\dot{\mathbf{R}}_{(:,j)} = \dot{\mathbf{Q}}_{(:,1)}^H \bar{\mathbf{A}}_{(:,j)}$
8) $\bar{\mathbf{A}}_{(:,j)} = \bar{\mathbf{A}}_{(:,j)} - \dot{\mathbf{R}}_{(:,j)} \dot{\mathbf{Q}}_{(:,1)}$
9) end
10) $\mathbf{M}_{(:,l)} = \ \dot{\mathbf{Q}}_{(:,1)} \dot{\mathbf{R}}_{(1,:)} (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H)\ $
11) end
12) $l = \max(\mathbf{M})$
13) $\mathbf{A} = \mathbf{A}_{1 \leftrightarrow l}$
14) $\mathbf{H}_k = \mathbf{A}$

$\dot{\mathbf{R}}_{(1,:)}$ 로 분해되어 10)과 같이 $\|\dot{\mathbf{Q}}_{(:,1)} \dot{\mathbf{R}}_{(1,:)} (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H)\|$ 을 $\mathbf{M}_{(:,l)}$ 에 저장한다. 12)는 식(19)를 만족하는 열의 교환을 찾기 위한 것이며 \mathbf{M} 을 가장 크게 할 수 있는 교환을 찾아 13)과 같이 서로의 열을 교환하고 14)와 같이 열 교환된 채널을 갱신함으로써 알고리즘을 마친다.

일반적으로 \mathbf{A} 는 N_T 개의 열로 되어 있기 때문에 서로의 열을 교환할 수 있는 경우의 수는 $N_T!$ (factorial)이지만 제안하는 알고리즘은 1번째 열만 교환함으로써 알고리즘을 마친다. 이는 MQRD의 특징을 이용하여 다음과 같이 설명할 수 있다. MQRD는 1)과 2)사이에 N_T 번의 반복 문구를 넣어 N_T 번의 반복 분해를 통해 \mathbf{A} 를 $\dot{\mathbf{Q}}$ 와 $\dot{\mathbf{R}}$ 로 분해하지만 $r = 1$ 이기 때문에 8)의 $\bar{\mathbf{A}}$ 는 Null 행렬이 되어 2)~ 11)을 N_T 번 반복 하더라도 $\dot{\mathbf{Q}}_{(:,2:N_T)} = 0$, $\dot{\mathbf{R}}_{(2:N_T,:)} = 0$ 이 나오게 된다. 따라서 10)의 \mathbf{M} 값

이 0이 됨으로 $2 \sim N_T$ 분해 과정을 통한 열 교환은 무의미하다. 즉, $r = 1$ 인 경우에는 \mathbf{H}_k 의 $2 \sim N_T$ 번째 열을 다른 열과 교환 하지 않고도 최대의 식(19)을 만족시킬 수 있다는 것을 나타내기 위해 MQRD를 이용한 전개 방식을 택했다. 일반적으로 $r = 1$ 일 때 \mathbf{A} 를 MQRD하게 되면 다음과 같이 $1 \times N_T$ 크기의 $\dot{\mathbf{Q}}$ 와 $N_T \times N_T$ 크기의 $\dot{\mathbf{R}}$ 로 분해된다.

$$\dot{\mathbf{Q}} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{(:,1)} & 0 & \dots & 0 \\ \dot{\mathbf{R}}_{(1,1)} & & & \end{pmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{R}} = \begin{pmatrix} \|\bar{\mathbf{A}}_{(:,1)}\| & \dot{\mathbf{Q}}_{(:,1)}^H \bar{\mathbf{A}}_{(:,2)} & \dots & \dot{\mathbf{Q}}_{(:,1)}^H \bar{\mathbf{A}}_{(:,N_T)} \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

채널 열 순열 기법을 통해 원하는 신호 전력의 크기가 어떻게 크게 보장받을 수 있는지는 \mathbf{H}_k^H 의 MQRD를 통해 다음과 같이 해석할 수 있다.

$$\mathbf{H}_k^H = \dot{\mathbf{Q}}_k \dot{\mathbf{R}}_k$$

$$\mathbf{H}_k = \dot{\mathbf{R}}_k^H \dot{\mathbf{Q}}_k^H = \dot{\mathbf{R}}_k \dot{\mathbf{Q}}_k^H \quad (21)$$

\mathbf{H}_k^H 를 MQRD를 통해 $\dot{\mathbf{Q}}_k \dot{\mathbf{R}}_k$ 로 분해되며 실수 값을 갖는 1×1 크기의 $\dot{\mathbf{R}}_k$ 은 $\dot{\mathbf{R}}_k = \dot{\mathbf{R}}_k^H$ 을 만족하기 때문에 $\mathbf{H}_k = \dot{\mathbf{R}}_k \dot{\mathbf{Q}}_k^H$ 라 할 수 있다. 따라서 $\|\mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H)\|$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{U} = (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H)$$

$$\|\mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H)\| = \|\dot{\mathbf{R}}_k \dot{\mathbf{Q}}_k^H \mathbf{U}\| \quad (22)$$

$\dot{\mathbf{R}}_k$ 은 MQRD를 통해 $\dot{\mathbf{R}}_k = \|\mathbf{H}_k^H\|$ 값을 가지며 $\dot{\mathbf{Q}}_k$ 와 \mathbf{U} 는 정규 직교 행렬로

표 2. 제안하는 알고리즘 ($r = 1$)

Table 2. Proposed algorithm ($r = 1$).

<p>for $k = 1 : K$ (Iteration for all Users)</p> <p>$\bar{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_1^T, \mathbf{H}_2^T, \dots, \mathbf{H}_{k-1}^T]$: Set leakage channel</p> <p>▶채널 열 순열 기법을 포함한 빔형성 벡터</p> <p>$[\bar{\mathbf{U}}_k, \bar{\mathbf{D}}_k, \bar{\mathbf{V}}_k] = \text{svd}(\bar{\mathbf{H}}_k)$, $\mathbf{V}_k = \bar{\mathbf{V}}_{k(:,1:k-1)}$</p> <p>: \mathbf{V}_k can be chosen from the corresponding generalized singular vectors to $k-1$ largest of</p> <p>$\mathbf{A} = \mathbf{H}_k$, $\dot{\mathbf{Q}} = \text{zeros}$, $\dot{\mathbf{R}} = \text{zeros}$</p> <p>for $l = 1 : N_T$</p> <p style="padding-left: 20px;">$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_{1 \leftrightarrow l}$</p> <p style="padding-left: 20px;">$\dot{\mathbf{R}}_{(1,l)} = \ \bar{\mathbf{A}}_{(:,1)}\$</p> <p style="padding-left: 20px;">$\dot{\mathbf{Q}}_{(:,1)} = \frac{\bar{\mathbf{A}}_{(:,1)}}{\mathbf{R}_{(1,l)}}$, $\bar{\mathbf{A}}_{(:,1)} = 0$</p> <p style="padding-left: 20px;">for $j = 2 : N_T$</p> <p style="padding-left: 40px;">$\dot{\mathbf{R}}_{(:,j)} = \dot{\mathbf{Q}}_{(:,1)}^H \bar{\mathbf{A}}_{(:,j)}$</p> <p style="padding-left: 40px;">$\bar{\mathbf{A}}_{(:,j)} = \bar{\mathbf{A}}_{(:,j)} - \dot{\mathbf{R}}_{(:,j)} \dot{\mathbf{Q}}_{(:,j)}$</p> <p style="padding-left: 20px;">end</p> <p style="padding-left: 20px;">$\mathbf{M}_{(:,l)} = \ \dot{\mathbf{Q}} \dot{\mathbf{R}} (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H)\$</p> <p>end</p> <p>$l = \max(\mathbf{M})$</p> <p>$\mathbf{A} = \mathbf{A}_{1 \leftrightarrow l}$</p> <p>$\mathbf{H}_k = \mathbf{A}$</p> <p>: perform channel ordering</p> <p>$\mathbf{H}_{\perp k} = \mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H)$</p> <p>: project \mathbf{H}_k to space at right angles to $\bar{\mathbf{H}}_k$</p> <p>$[\mathbf{U}_{\perp k}, \mathbf{D}_{\perp k}, \mathbf{V}_{\perp k}] = \text{svd}(\mathbf{H}_{\perp k})$, $\mathbf{Q}_k = \mathbf{V}_{\perp k}(:,1)$</p> <p>: \mathbf{Q}_k can be chosen from the corresponding generalized singular vectors to 1 largest of</p> <p>$[\mathbf{L}_k, \mathbf{F}_k] = \text{LQ}(\mathbf{H}_k \mathbf{Q}_k)$: LQ decomposition</p> <p>end</p>

식(22)의 $\dot{\mathbf{Q}}_k^H \mathbf{U}$ 는 $\dot{\mathbf{Q}}_k$ 와 \mathbf{U} 의 내적 연산이 된다. 만약 $\dot{\mathbf{Q}}_k$ 이 \mathbf{U} 와 같은 평면 위의 정규 직교

행렬이라면 $\|\dot{\mathbf{Q}}_k^H \mathbf{U}\| = 1$ 이며 $\|\mathbf{H}_k\| = \|\dot{\mathbf{R}}_k \dot{\mathbf{Q}}_k^H \mathbf{U}\|$, 즉, 식(19)의 이상적 결과인 $\|\mathbf{H}_k\| = \|\mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H)\|$ 을 달성할 수 있다. 하지만 실제로는 $\dot{\mathbf{Q}}_k$ 와 \mathbf{U} 은 같은 평면 위에 있지 않기 때문에 $\dot{\mathbf{Q}}_k^H \mathbf{U}$ 의 각 열의 크기는 1보다 작은 값을 가지게 된다. 따라서 $\dot{\mathbf{Q}}_k^H \mathbf{U}$ 이 정규 직교 행렬이 되기 위해서는 $\dot{\mathbf{R}}_k$ 의 값에서 일정치를 보상받게 되며 $\dot{\mathbf{R}}_k$ 의 값은 채널이 가지고 있는 최대 전력 $\|\mathbf{H}_k^H\|$ 보다 작은 값을 가진다. 결론적으로 $\|\mathbf{H}_k\| > \|\mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k^H)\|$ 이 됨으로 원하는 신호 전력이 줄어든다. 따라서 표1의 12)와 같이 \mathbf{M} 의 최대값을 찾는다는 의미는 최대한 $\dot{\mathbf{Q}}_k$ 와 \mathbf{U} 이 같은 평면에 있도록, 즉, 상관성이 크도록 하는 열의 교환을 찾는다는 뜻이다. 표2는 제안하는 알고리즘이며 이를 통해 \mathbf{Q}_k , \mathbf{F}_k , \mathbf{L}_k 를 생성한다.

제안하는 알고리즘 표2를 통해 식(12)의 \mathbf{R} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$\mathbf{R} = \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{F}$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \mathbf{Q}_1 \mathbf{F}_1 & \dots & \text{Null} & \dots & \text{Null} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{H}_k \mathbf{Q}_1 \mathbf{F}_k & \dots & \mathbf{H}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{F}_k & \dots & \mathbf{H}_k \mathbf{Q}_K \mathbf{F}_K \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_K \mathbf{Q}_1 \mathbf{F}_K & \dots & \mathbf{H}_K \mathbf{Q}_k \mathbf{F}_K & \dots & \mathbf{H}_K \mathbf{Q}_K \mathbf{F}_K \end{bmatrix} \quad (23)$$

식(21)과 같이 사용자에 대한 누출 채널에 해당 하는 상부 삼각 성분들은 $r \times r$ 크기의 *Null* 행렬들이 됨을 알 수 있다. 또한 채널 \mathbf{H}_k 는 열 순열 기법을 수행했기 때문에 식(23)의 대각 성분의 크기는 채널 열 교환을 하지 않았을 때의 대각 성분의 크기보다 큰 값을 갖는다.

[5]에서도 언급 했듯이 DPC는 식(23)를 기반으로 \mathbf{B} 를 생성해 그림1과 같이 Feedback시켜 누출 채널 정보를 받을 수 있고 이를 기반으로 송신단에 서 DPC를 수행한다. 하지만 [5], [6], 그리고 본

논문에서 사용된 DPC는 누출 채널을 미리 알아야 하며 비인과적 시스템, 부호화와 복호화의 높은 복잡성과 같은 이유로 실제 시스템에 적용하기 힘들다^[12]. 따라서 [13]과 같이 DPC기법의 현실 구현의 어려움을 고려하여 제안된 기법 등을 ZF-THP, DB-GMD THP등에 접목시켜 현실 구현에 용이한 연구가 필요하다.

IV. 모의실험

본 모의실험은 2명의 사용자가 각각 $r=1$ 개의 수신 안테나를 가지고 있는 Broadcast 하향링크 환경에서 제안하는 기법과 기존기법의 BER 성능과 Achievable Sum-Rate 성능을 비교 평가한다. 평균이 0이고 분산이 1인 독립적인 복소 가우시안 채널 행렬 \mathbf{H}_k 를 사용하였다.

그림3은 모든 사용자가 16-QAM의 변조 방식을 적용한 제안하는 기법과 기존의 SSLNR-ZF-THP 기법의 BER 성능 그래프이다. (2), (4)는 각각 $N_T=2$, $N_T=4$ 를 나타낸다. Proposed scheme without channel ordering은 표2의 알고리즘에서 채널 열 순열 기법을 수행하지 않았을 때의 그래프이며 Proposed scheme with channel ordering은 표2의 알고리즘을 적용한 그래프이다. $N_T=2$ 일 때 채널 열 순열 기법을 수행한 제안하는 기법이 기존기법에 비해 BER이 10^{-2} 에서 약 3.7dB, $N_T=4$ 일 때 채널 열 순열 기법을 수행한 제안하는 기법이 기존기법에 비해 BER이 10^{-3} 에서 약 1.8dB의 성능향상을 보인다. 채널 열 순열 기법을 수행하지 않은 제안하는 기법은 SNR이 낮은 구간에서는 기존기법에 비해 더 나은 성능을 보이지만 SNR이 높은 구간에서는 성능이 역전되는 것을 알 수 있다. 이는 SNR이 높은 구간에서는 기존기법과 같이 SSLNR 최대화 빔형성 벡터를 사용 하더라도 누출 전력의 크기를 0에 가깝게 만들 수 있다. 따라서 제안하는 기법을 사용하여 누출 전력을 제거하더라도 SSLNR 최대화 빔형성 벡터와 비교해 큰 장점을 보이지 못한다. 또한 원하는 신호 전력의 크기를 크게 보장할 수 없다는 단점 때문에 SNR이 높아질수록 SSLNR 최대화 빔형성 벡터를 사용한 기존기법에 비해 성능의 열화를 보인다. 따라서 표1과 같이 채널 열 순열 기법을 포함한 제안하는 기법을 적용함으로써

누출 전력을 최소화 시키는 동시에 보장받지 못했던 원하는 신호 전력의 크기를 높일 수 있다. 결과적으로 모든 SNR 구간에서 제안하는 기법이 기존 기법 보다 더 나은 성능을 보인다.

그림4는 각각 사용자가 채널 이득이 큰 순서대로 16-QAM의, 4-QAM의 변조 방식을 차등으로 적용한 제안하는 기법과 기존의 SSLNR-ZF-THP 기법의 BER 성능 그래프이다. mc는 Multiple constellation의 약자이다. $N_T=2$ 일 때 채널 열 순열 기법을 수행한 제안하는 기법이 기존기법에 비해 BER이 10^{-2} 에서 약 5dB, $N_T=4$ 일 때 채널 열 순열 기법을 수행한 제안하는 기법이 기존기법에 비해 BER이 10^{-3} 에서 약 2dB의 성능향상을 보인다.

그림5는 셀 내부 사용자들이 달성할 수 있는 합 용량(Achievable Sum Rate)이다. 채널 열 순열 기법을 수행한 제안하는 기법은 기존기법의 성능 차이는 거의 없으며 열 순열 기법을 수행하지 않은 제안기법과는 SNR이 25dB에서 0.25bps/Hz의 성능향상을 보인다. 위에서 언급 했듯이 본 제안하는 기법에 사용 된 IUI 알고리즘은 원하는 신호의 전력을 크게 보장할 수 없다. 따라서 채널 열 순열 기법을 수행하지 않게 되면 원하는 신호 전력이 기존의 기법에 비해 열화를 보인다. 따라서 채널 열 순열 기법을 수행하여 원하는 신호의 전력을 높이며 결론적으로 사용자들이 달성할 수 있는 합 용량은 기존 기법과 비슷하게 만들 수 있다. 그림3과 그림5를 통해 제안하는 기법은 사용자들이 달성할 수 있는 합 용량을 기존기법과 같이 높게 유지하면서 BER 성능 향상을 시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 CoMP CB 시나리오에서 기존의 SSLNR-ZF-THP의 BER성능을 높이기 위한 IUI 제거 알고리즘의 적용과 채널 열 순열 기법을 제안하였다. IUI 제거 알고리즘을 SSLNR환경의 ZF-THP에 적용함으로써 누출 전력을 제거할 수 있었다. 하지만 제안하는 기법을 적용 시 누출 전력을 제거했음에도 불구하고 원하는 신호 전력의 크기를 크게 보장할 수 없다는 문제점 때문에 SNR이 높은 환경에서 기존의 기법보다 열화된 성능을 보였다. 이를 보완하기 위해 적절한 채널 열 순열 기법을 제안하였고 이로써 모든 SNR 구간에서 기존의

SSLNR-ZF-THP 보다 더 나은 BER 성능을 보일 수 있다.

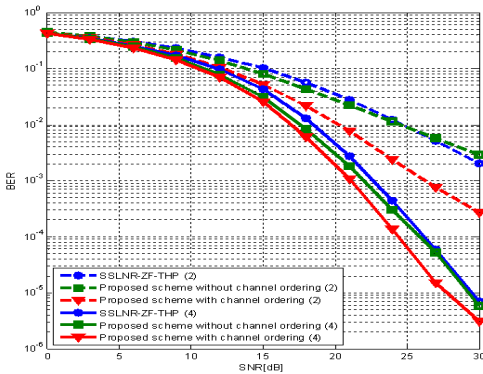


그림 3. 기존의 기법과 제안하는 기법의 비트오류확률 성능 곡선 (16-QAM)
Fig. 3. BER performance of existing scheme and proposed scheme (16-QAM)

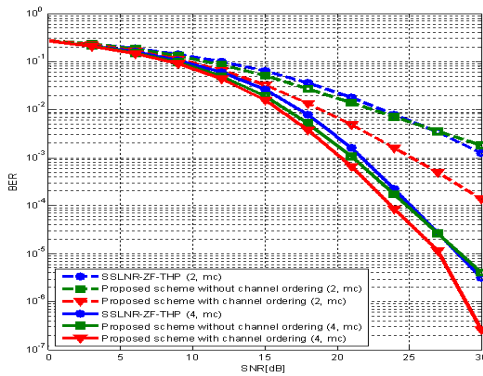


그림 4. 기존의 기법과 제안하는 기법의 비트오류확률 성능 곡선 (16-QAM, 4-QAM)
Fig. 4. BER performance of existing scheme and proposed scheme (16-QAM, 4-QAM)

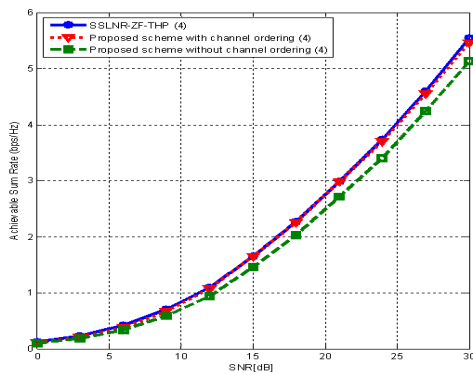


그림 5. 기존의 기법과 제안하는 기법의 달성 가능한 합용량 성능 곡선
Fig. 4. Achievable Sum-Rate performance of existing scheme and proposed scheme

References

- [1] P. Marsch and G. P. Fettweis, *Coordinated Multi-Point Mobile Communications*, Cambridge University press, Aug, 2011.
- [2] L. Wengang, Y. Kechu, D. Zhu, and Y. sun, "Codebook selected beamforming algorithm for multiuser MIMO systems," *IEEE J. Syst. Eng. Electron.*, vol. 22, no. 1, pp. 170-174, Feb, 2011.
- [3] C. B. Peel, B .M. Hochwald, and A. L. Swindlehurst, "A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication –Part I: channel inversion and regularization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 1, pp. 195-202, Jan. 2005.
- [4] H. S. An, M. Mohasen, and K. H. Chang, "Adaptive coordinated Tx-Rx beamforming for multi-user MIMO system," *J. KICS*, vol. 35, no. 4, pp. 386-394, Apr, 2010.
- [5] L. Shaowei, W. W. L Ho, and L. Yingchang, "Block-diagonal geometric mean decomposition (BD-GMD) for multiuser MIMO broadcast channels," in *Proc. IEEE Int. Symp. PIMRC'06*, pp. 1-5, Helsinki, Finland, Sep. 2006.
- [6] W. W. L Ho, T. Q. S. Quek, and S. Sun, "Decentralized base station processing for multiuser MIMO downlink CoMP," in *Proc. IEEE Veh. Technology Conf.*, pp. 1-5, Taipei, Taiwan, May, 2010.
- [7] X. Zhang, C. He, and L. Jiang, "Successive SLNR based precoding for downlink multi-user MIMO systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun*, pp. 1-5, Kyoto, Japan, June, 2011.
- [8] A. Tarighat, M. Sadek, and A. H. Sayed, "A multi user beamforming scheme for downlink MIMO channels based on maximizing signal-to leakage ratios," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Process. (ICASSP)*, vol. 3, pp. 1129-1132, Philadelphia, U.S.A., Mar. 2005.
- [9] M. Sadek, A. Tarighat, and A. H. Sayed, "Active antenna selection in multi-user MIMO

- communication,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 55, no. 4, pp. 1498-1510, Apr. 2007.
- [10] Y. S. Cho and Y. S. Byun, “New ZF-THP technique based on successive SLNR in CoMP System,” *KSPC 2012*, pp. 229-232, Seoul, Korea, Sep. 2012.
- [11] K. H. Lin, C. H. Lin, C. H. Chang, C. L. Huang, and F. C. Chen, “Iterative QR decomposition architecture using the modified Gram-Schmidt algorithm,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Syst. (ISCAS)*, pp. 1409-1412, Island of Kos, Greece, May 2009.
- [12] N. Jindal and A. Goldsmith, “Dirty-paper coding versus TDMA for MIMO broadcast channels,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 51, no. 5, pp. 1784-1794, May 2005.
- [13] S. T. Kim, W. H. Seo, K. C Kwak, and D. S. Hong, “Modified block diagonalization precoding with greedy approach,” *J. KICS*, vol. 33, no. 1, pp. 79-85, Apr. 2008.

조 용 석 (Yong-soeck Cho)



2011년 2월 인천대학교 전자공학과 학사 졸업
 2011년 3월~현재 인천대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 이동 통신, 통신공학, MIMO-OFDM

변 윤 식 (Youn-shik Byun)



1978년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업
 1981년 2월 연세대학교 전자공학과 석사
 1985년 2월 연세대학교 전자공학과 박사
 1990년 8월~1991년 7월 미국 Stanford대학 전자공학과 객원 교수
 2004년 9월~2005년 8월 고려대학교 전파통신 공학과 객원 교수
 2006년 7월~2008년 2월 인천대학교 공과대학장
 2008년 3월~2008년 7월 인천대학교 교무처장
 2010년 8월~2011년 12월 인천대학교 대학원장
 1987년 3월~현재 인천대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> 디지털 통신 및 신호 처리