

다중사용자 다중송수신안테나 Broadcast 채널에서의 RUB 기반 공간다중화 시스템

준회원 박 성 호*, 정회원 박 기 흥**, 이 진 희**, 종신회원 고 영 채**, 정회원 김 성 진***

Spatial Multiplexing System based on Random Unitary Beamforming for MU-MIMO Broadcast Channel

Seong-Ho Park* Associate Member, Ki-Hong Park**, Jinhee Lee** Regular Members, Young-Chai Ko** Lifelong Member, Sung-Jin Kim*** Regular Member

요 약

Random Unitary Beamforming (RUB) 은 다중사용자 다중안테나 broadcast 채널에서 매우 간단하면서도 실제적인 전송 기법이다. 본 논문에서는 일반적인 RUB의 형태를 확장시켜 공간다중화 이득을 얻을 수 있는 방법에 대해 고려하였다. 즉 수신기가 2개의 안테나를 가짐으로써 더 많은 데이터를 가지는 방법을 고려하였다. 이를 위해 송신기와 수신기의 새로운 코드북을 제안하고, 수신기에서 Minimum Mean Square Error Successive Interference Cancellation (MMSE-SIC) 기법을 사용함으로써 총 전송율이 증가함을 모의실험 결과를 통해 확인하였다.

Key Words : random unitary beamforming (RUB), MIMO broadcast channel, minimum mean square error, successive interference cancellation (MMSE-SIC), spatial multiplexing

ABSTRACT

Random unitary beamforming (RUB) is a very low complexity and practical transmission scheme for multiuser MIMO broadcast channel. In this paper, we propose the scheme that obtains the spatial multiplexing gain on the extension of the conventional RUB, that is, the receiver with two antennas is compared to that with one antenna in a conventional RUB, which results in the increased capacity.

So, we propose the new codebook and the minimum mean square error successive interference cancellation (MMSE-SIC) receiver filter. We show the simulation result that the sum-rate of proposed system is increased.

1. 서 론

Random unitary beamforming (RUB) 은 다중사용자 다중송수신안테나 Broadcast 채널 (MU-MIMO BC) 환경 하에서 낮은 복잡도를 가지는 전송기법이다^[1]. 간섭 제거 빔포밍 방식 (ZFBS)^[2] 과 더티 페

이퍼 코딩 방식 (DPC)^[3] 의 경우는 기지국이 각 사용자에게 대한 채널 정보를 모두 알아야 하는 상당히 높은 복잡도의 문제를 가지고 있어 실제 구현에 어려움이 있다. 반면 RUB는 좀 더 실제적인 환경을 고려하여 부분적인 채널 정보만으로도 간섭 제거 빔포밍 방식이나 더티 페이퍼 코딩 방식과 근접한

※ 본 연구는 서울시 산학연 협력사업(WR080951)의 연구결과로 수행되었습니다.

* 고려대학교 통신시스템기술협동과정 통신시스템 연구실 (walli@korea.ac.kr),

** 고려대학교 전자전기공학과 (lgn552, locojini, koyc1@korea.ac.kr), *** 삼성종합기술원 (jamesungjin.kim@gmail.com)

논문번호 : KICS2009-08-377, 접수일자 : 2009년 8월 29일, 최종논문접수일자 : 2010년 1월 29일

성능을 가짐으로써 낮은 복잡도로 전송하는 것을 구현하는데 유리한 것으로 알려져 있다¹⁾.

이에 따라 RUB에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 일반적인 RUB는 기지국의 안테나 개수만큼의 사용자와 통신하고 하나의 안테나를 가진 사용자가 기지국에 단일개의 최대 신호 대비 잡음 및 간섭 (SINR) 값과 빔 인덱스를 보내게 된다¹⁾. 최근 RUB의 확장된 방법으로 사용자의 안테나 개수가 2 개인 수신기에서 minimum mean square error (MMSE) 수신 필터를 써서 성능을 향상시키는 연구결과가 발표되었다⁴⁾.

본 논문에서는 위와 같은 연구를 확장시켜 동일하게 사용자가 2개의 안테나를 가졌을 경우, 공간다중화 이득을 얻을 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 먼저 피드백 부하를 낮추기 위하여 빔 부분집합 코드북을 고려하였는데, 전체 빔 집합에서 2개의 빔을 선택하여 빔 부분집합을 형성하고 사용자와 기지국 간에 빔 부분집합 인덱스만을 전송함으로써 각 사용자에게 가장 큰 전송율을 보이는 2개의 빔에 대한 정보를 전달하는 것을 가능하게 하였다. 그리고 수신기에서는 minimum mean square error successive interference cancellation (MMSE-SIC)를 사용함으로써 시스템의 성능이 향상될 수 있음을 확인하였다. 또한 동일한 피드백 조건으로도 성능이 향상됨도 확인할 수 있었다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 2절에서는 새로 제안한 공간다중화 시스템을 모델링하고 기지국에서 전송하는 신호와 기지국과 사용자 사이의 채널을 정의한다. 또한 이러한 시스템 환경에 맞는 새로운 코드북 기법을 제안한다. 3절에서는 제안한 시스템에서 수신단에서 MMSE-SIC 필터를 썼을 때의 신호 대비 잡음 및 간섭을 분석한다. 그리고 기지국에서의 사용자 결정 방식을 설명하고 최종적으로 총 전송율에 대한 식을 유도한다. 4절에서는 제안한 방법을 다양한 모의 실험을 통해 성능이 향상됨을 확인한다. 5절에서는 이 논문에 대한 결론을 내리며 마무리 짓는다.

II. RUB 공간다중화 시스템 서문

2.1 RUB 공간다중화 시스템 모델

기존의 RUB의 경우, 피드백은 사용자의 출력 신호 대비 잡음 및 간섭이 가장 큰 하나의 빔에 대한 인덱스만을 보내는 것이었다. 빔 벡터 집합을 U 라고 정의하면, M 개의 안테나를 가진 기지국을 고려

할 때 M 개의 임의의 직교 벡터를 원소로 가지는 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_M\}$ 으로 정의되고, 사용자는 이 중 하나의 빔 인덱스를 피드백 해 주면 된다.

기지국에서는 총 M 명의 선택된 사용자에게 대한 빔을 형성하게 된다. 그리하여 선택된 각 사용자에게 보낼 정보 (s_m)를 빔 벡터 (u_m)과 곱하여 전송한다.

$$x = \sum_{m=1}^M u_m s_m \quad (1)$$

이 때, 전송 신호 벡터 x 의 평균 전력은 최대 평균 전송 전력 P 로 제한된다. 즉, $E(\cdot)$ 는 평균을 나타내고, $(\cdot)^H$ 는 Hermitian transpose를 나타낸다면, $E(x^H x) \leq P$ 의 조건을 갖는다.

여기서 기존의 수신하는 사용자의 안테나 개수를 확장시켜, 2개의 빔을 이용하여 한 사용자가 하나의 단위 데이터 시간 당 2개의 데이터를 수신할 수 있는 시스템 모델을 생각할 수 있다. 그림 1에서 이러한 시스템 모델을 확인할 수 있다.

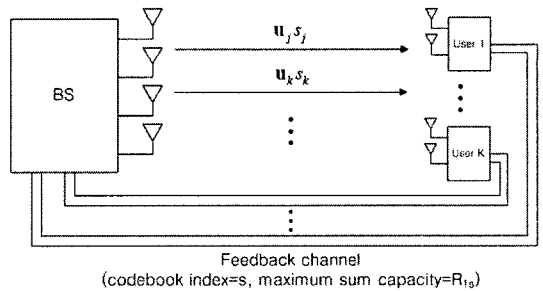


그림 1. RUB 공간다중화 시스템 모델

2.2 빔 부분집합 코드북 디자인

N 개의 안테나를 가진 사용자가 N 개의 데이터를 받는다고 가정하면, 각 사용자는 N 개의 빔 인덱스를 피드백 해야 하고, 이는 빔 인덱스의 관점에서 피드백의 부담이 N 배로 늘어나게 됨을 의미한다. 이러한 피드백 부담을 줄이기 위해 2개의 빔 원소로 구성된 빔 부분집합을 고려한다. 그러므로 각각의 코드북 원소는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_s = \{u_j, u_k\} \quad j < k, \quad j, k \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad s \in \{1, 2, \dots, M C_2\} \quad (2)$$

M 개의 빔을 전송하는 기지국을 생각했을 때, 사

용자가 2개의 빔을 피드백 하는 것은 총 $M C_2$ 가지의 경우를 고려할 수 있다. 그러므로 코드북은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_{M C_2}\} \quad (3)$$

이것을 빔 부분집합으로 표현하여, 기지국과 사용자가 그러한 빔 부분집합으로 구성된 코드북을 서로 인지하고 통신하는 것을 생각한다.

즉, 빔 벡터 집합 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ 라고 하면, 코드북 C 는 $C = \{(u_1, u_2), (u_1, u_3), (u_1, u_4), (u_2, u_3), (u_2, u_4), (u_3, u_4)\}$ 가 되고 기지국과 사용자는 코드북의 원소인 빔 부분집합을 코드북 인덱스로 가지게 된다.

이 논문에서는 우리는 다음과 같은 시스템 환경을 가정한다. 우선, 기지국과 사용자가 앞서 제안한 빔 부분집합 코드북 기법을 쓰고 기지국과 사용자의 안테나 개수가 각각 4, 2인 그림 1과 같은 실제적인 시스템 환경을 생각한다. 즉, 기지국이 사용자보다 안테나 개수가 많고, 전체 사용자의 수는 기지국의 안테나 개수보다 훨씬 많은 시스템 환경을 가정한다. 기지국의 안테나 개수가 4개 이상의 경우도 고려할 수 있으나, 기존의 시스템 환경과의 성능 비교의 문제와 코드북 원소 개수의 증가로 인한 수신단에서의 복잡도 증가와 피드백 부하의 증가 문제 등으로 인해 이 논문에서는 그러한 시스템 환경을 고려하지 않는다. 이것은 또한 RUB를 사용해서 낮은 복잡도로 시스템을 구현하려는 목적과도 부합되지 않기 때문이다.

각 사용자 i 는 서로 각기 다른 채널을 받게 되므로 다음과 같은 행렬로 표현된다.

$$H_i = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 각각의 h_{kl} 은 서로 독립적이고 동일한 분포를 가지게 된다. 그리고 H_i 의 각 행은 기지국 안테나로부터 각 수신 안테나가 받는 채널이 됨을 알 수 있다.

III. MMSE-SIC 수신 필터를 가진 RUB 공간다중화 시스템

3.1 MMSE-SIC 필터의 신호 수신

RUB 공간다중화 시스템에서 사용자 i 가 갖게

되는 수신신호는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$y_i = H_i u_j s_j + H_i u_k s_k + \sum_{m=1, m \neq j, k}^4 H_i u_m s_m + n_i \quad (5)$$

여기서 사용자가 받기 원하는 신호는 s_j, s_k 이고, 3번째 항은 간섭으로 작용하게 된다. 또한, 실제 채널 이득은 $c_{ij} = H_i u_j$ 으로 표현할 수 있다.

각각의 사용자는 MMSE-SIC 수신 필터를 사용하는 것을 고려한다. 그러므로 수신신호벡터(y_i)에 복소 가중치 벡터가 곱해진 형태의 신호 z_i 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_i = w_i^H y_i \quad (6)$$

이 때의 가중치 벡터는 사용자의 안테나의 개수가 2개이므로 총 2개의 빔에 대하여 계산하게 된다. 즉, 각각의 빔 부분집합 C_s 에 대하여 $w_i^{(s)} = [w_{ij}^{(s)} \ w_{ik}^{(s)}]^T$ 의 형태를 생각할 수 있다. 여기서 $w_{ij}^{(s)}$ 는 MMSE 방법을 이용하여 구하게 되고, $w_{ik}^{(s)}$ 는 처음 $w_{ij}^{(s)}$ 를 통해 구한 첫번째 빔을 간섭 신호로 간주하고, 이를 제거시킨 후 얻을 수 있다. 여기서 간섭 제거 할 때의 오차 특성은 고려하지 않는다.

MMSE에 대한 첫 번째 가중치 벡터 $w_{ij}^{(s)}$ 는 다음과 같은 결과를 가진다⁵⁾.

$$\begin{aligned} w_{ij}^{(s)} &= \left(\sum_{m=1, m \neq j}^4 c_m c_m^H + \frac{1}{\rho} \mathbf{I} \right)^{-1} c_j \\ &= (H_i u' u'^H H_i^H + \frac{1}{\rho} \mathbf{I})^{-1} H_i u_j \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 u' 는 u_j 가 빠진 새로운 행렬을 의미한다. 즉, $j=1$ 이라 하면 $u' = [u_2, u_3, u_4]$ 가 된다. 마찬가지로 이때의 최대 신호 대비 잡음 및 간섭 값은 다음과 같다⁶⁾.

$$\begin{aligned} \gamma_{ij}^{(s)} &= c_j^H \left(\sum_{m=1, m \neq j}^4 c_m c_m^H + \frac{1}{\rho} \mathbf{I} \right)^{-1} c_j \\ &= u_j^H H_i^H (H_i u' u'^H H_i^H + \frac{1}{\rho} \mathbf{I})^{-1} H_i u_j \end{aligned} \quad (8)$$

두 번째 가중치 벡터 $w_{ik}^{(s)}$ 는 첫 번째 빔을 제거한 후 얻어지므로, 다음과 같은 결과를 가진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{ik}^{(s)} &= \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j,k}}^4 \mathbf{c}_m \mathbf{c}_m^H + \frac{1}{\rho} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{c}_k \\ &= (\mathbf{H}_i \mathbf{u}'' \mathbf{u}''^H \mathbf{H}_i^H + \frac{1}{\rho} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_i \mathbf{u}_k \end{aligned} \quad (9)$$

이 때 \mathbf{u}'' 는 $\mathbf{u}_j, \mathbf{u}_k$ 가 빠진 행렬을 의미한다. 즉, $j=1, k=2$ 라 하면 $\mathbf{u}'' = [\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_4]$ 가 됨을 알 수 있다. 첫 번째 빔에 대한 간섭을 제거 시킨 후의 두 번째 빔에 대한 최대 신호 대비 잡음 및 간섭 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_{ik}^{(s)} &= \mathbf{c}_k^H \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j,k}}^4 \mathbf{c}_m \mathbf{c}_m^H + \frac{1}{\rho} \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{c}_k \\ &= \mathbf{u}_k^H \mathbf{H}_i^H (\mathbf{H}_i \mathbf{u}'' \mathbf{u}''^H \mathbf{H}_i^H + \frac{1}{\rho} \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}_i \mathbf{u}_k \end{aligned} \quad (10)$$

3.2 사용자 결정과 총 전송율 분석

III-1과 같은 방식으로 사용자가 모든 빔 부분집합에 대해 신호 대비 잡음 및 간섭 값을 구하면, 사용자는 각 빔 부분집합에 대한 전송율의 최대값을 위에서 구한 두 개의 신호 대비 잡음 및 간섭 값을 이용하여 구하게 된다.

$$R_{i_s} = \log_2(1 + \gamma_{ij}^{(s)}) + \log_2(1 + \gamma_{ik}^{(s)}) \quad (11)$$

그러면 사용자는 이렇게 구해진 전송율의 최대값 (R_{i_s})과 이 때의 빔 부분집합 인덱스 (b_i)를 기지국에 피드백 하게 된다.

$$b_i = \arg \max R_{i_s} \quad (12)$$

또한, 기지국은 모든 사용자에게 빔 부분집합 인덱스와 그 때의 전송율의 최대값을 받으면 어떤 사용자에게 원하는 신호를 보낼지를 결정하게 된다. 먼저 같은 빔 부분집합 s 를 인덱스로 가지는 사용자들 중 가장 큰 전송율의 최대값을 갖는 사용자를 선택한다. 총 4개의 빔이 있다고 가정한 경우, 빔 부분집합은 $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2), (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_3), (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_4), (\mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3), (\mathbf{u}_2, \mathbf{u}_4), (\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_4)$ 의 경우의 수를 가지므로 빔 부분집합 인덱스 $b_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 의 총 6가지를 생각할 수 있고, 이에 대한 각각의 전송율의 최대값을 가지는 사용자를 선택한다.

$$k_s^* = \arg \max_{i \in \{1, \dots, N\}} R_{i_b} \quad (13)$$

그러면 각 빔 부분집합에 대한 전송율의 최대값을 R_{jk}^* 와 같이 표현할 수 있다.

여기서 모든 빔이 사용되는 조합은 $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2), (\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_4)$ 또는 $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_3), (\mathbf{u}_2, \mathbf{u}_4)$ 또는 $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_4), (\mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3)$ 총 3가지의 경우가 있다. 그러므로 총 전송율은 다음과 같이 계산된다.

$$R_{sys} = \max(R_{12}^* + R_{34}^*, R_{13}^* + R_{24}^*, R_{14}^* + R_{23}^*) \quad (14)$$

3.3 피드백 부하의 비교

기존의 RUB 시스템은 각 사용자가 기지국에 모든 빔 중 가장 큰 신호 대비 잡음 및 간섭 값과 이 때의 빔 인덱스를 보내는 것이었다. 본 논문에서 제안한 RUB 공간다중화 시스템은 모든 빔 부분집합 중 가장 큰 전송율을 보이는 빔 부분집합 코드북 인덱스와 그 때의 전송율 값을 보내게 된다. 코드북 크기를 빔 인덱스 크기와 동일하게 한다면 제안한 시스템은 기존의 시스템과 피드백 관점에서 동일한 부하를 가짐을 알 수 있다.

IV. 모의실험결과

여기서는 위에서 제안한 MMSE-SIC 필터를 쓴 RUB의 성능을 살펴본다. 실제적인 환경을 고려하여 기지국 안테나의 개수(N_t)는 4개, 각 사용자(K)의 안테나 개수(N_r)는 2개, 전체 수신 안테나의 개수는 20, 50으로 고정시키고 이에 대한 총 전송율을 확인해 본다. 즉, 단위 셀에서 하나의 기지국은 10, 25명의 사용자와 통신하는 것으로 가정하고 모의실험 결과를 확인하였다.

[1]과 [4]의 결과들과 피드백 부하가 동일한 조건에서의 결과를 비교하기 위해 앞 절에서 제안한 빔 부분집합 인덱스 기법의 크기를 6개에서 4개로 줄여주었다. 즉, 빔 부분집합 중에 $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2), (\mathbf{u}_3, \mathbf{u}_4)$ 또는 $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_3), (\mathbf{u}_2, \mathbf{u}_4)$ 또는 $(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_4), (\mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3)$ 총 3가지 경우 중 하나만 제외시키면 되고, 이것은 복잡도가 감소되는 장점을 가진다. 이러한 경우 실제 성능의 차이는 그리 크지 않음을 그림 2에서 확인할 수 있다. 그림 2에서 full beam subset은 기존의 시스템과의 피드백을 고려하지 않은 전체 빔 부분집합 크기인 6을 의미하고, partial beam subset이 빔 부분집합의 크기를 4개로 줄여준 경우를 의미한다.

제안한 시스템에서 MMSE-SIC 수신 필터를 사용함으로써 인한 성능 향상을 그림 3에서 동일한 공

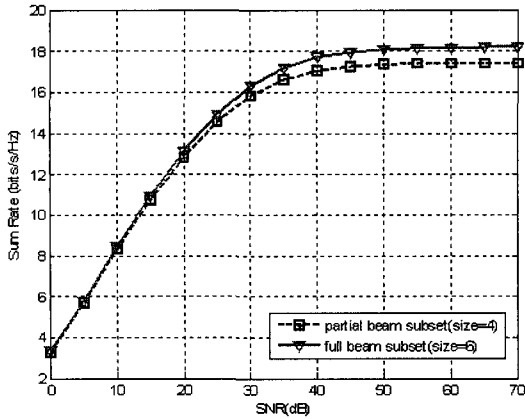


그림 2. beam subset size 비교 ($N_r = 2, K = 25$)

간다중화 시스템에서의 MMSE 방식을 사용했을 때와 비교하여 확인할 수 있다. 그림 3을 통해 제안한 시스템에서는 MMSE-SIC 방식이 항상 MMSE 방식보다 더 나은 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

그림 4에서는 피드백 부하가 동일한 조건 하에서 기존의 시스템과의 성능 차이를 모의실험 결과를 통해 확인하였다. 그림의 결과를 보면 알 수 있듯이, 총 전송을 측면에서 기존의 일반적인 RUB에서 보다 더 나은 성능을 보일 뿐만 아니라, 기존 시스템에서 MMSE 방법을 사용했을 때보다도 특별히 SNR이 높은 상황에서 총 전송율이 선형적으로 증가하지 않고 한계치에 머무는 문제에서도 보다 나은 성능 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다. 그림 4의 결과에서 conv는 기존의 일반적인 RUB를 나타

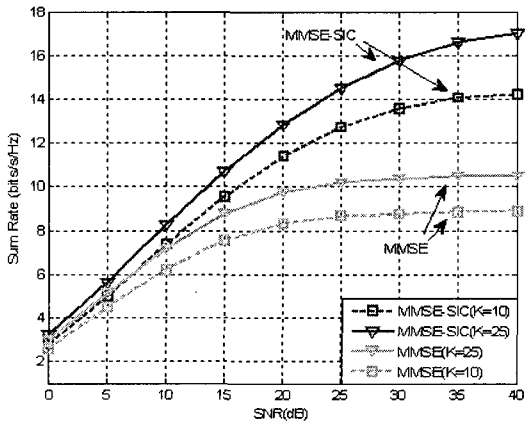


그림 3. 제안한 RUB 시스템에서의 수신 필터에 따른 성능 비교

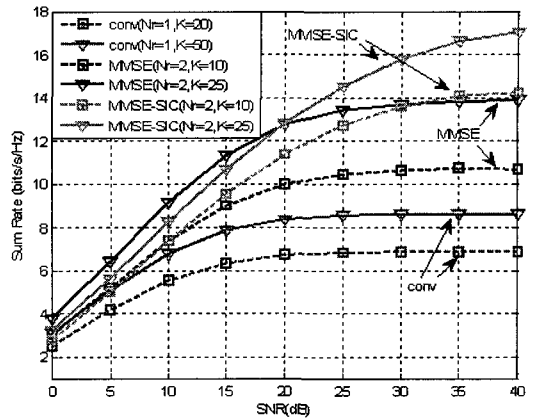


그림 4. 기존의 RUB와 MMSE RUB, 새로 제안한 공간다중화를 얻는 MMSE-SIC RUB의 총 전송을 비교

내고^[1], MMSE는 기존 시스템에서의 MMSE RUB 방식^[4], MMSE-SIC는 이 논문에서 제안하는 공간다중화 시스템 방식을 나타낸다.

제안한 시스템이 기존 시스템 OC보다 특정 상황, 즉, SNR과 사용자 수에 따라 약간의 성능 저하(총 전송을 1 bit/s/Hz 이내)를 나타내기도 하는데, 이는 SNR이 낮은 상황에서는 제안한 시스템의 간섭 제거 효과가 크지 않기 때문이다. 제안한 시스템의 사용자 수에 따른 성능과 기존 시스템과의 성능 비교에 따른 적절한 사용자 수와 SNR은 그림 5를 통해 알 수 있다. OC는 기존의 MMSE RUB 방식을 나타내고^[4], SM은 이 논문에서 제안한 MMSE-SIC 시스템 방식을 나타낸다.

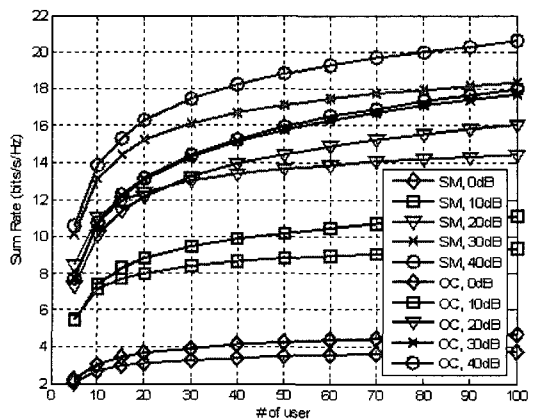


그림 5. 사용자 수와 SNR에 따른 기존의 MMSE RUB 시스템(OC)과 제안한 MMSE-SIC 시스템(SM)의 총 전송을 비교

V. 결 론

본 논문에서는 RUB 기반의 다중사용자 다중안테나 시스템 상황에서 2개의 수신 안테나를 가진 공간다중화 이득을 얻는 방법을 생각하였다. 이를 위해 MMSE-SIC를 적용시켜 시스템의 성능을 향상시켰는데, 기존의 한 개의 수신 안테나를 가진 경우뿐만 아니라, 2개의 수신 안테나를 가진 MMSE 방법의 경우보다도 동일한 피드백 부하 조건 하에서도 성능이 향상될 수 있음을 확인하였다. 이를 위해 새로운 코드북 기법인 빔 부분집합 코드북을 제안하였고, 하나의 총 전송율의 최대값과 하나의 빔 부분집합 인덱스를 피드백 해 줌으로써, 동일한 피드백 환경을 만들어 줄 수 있음을 확인하였다.

한편 제안한 시스템은 SNR이 높은 곳에서 기존의 한 개의 수신안테나 방법이나 2개의 수신 안테나를 가진 MMSE 방법에서 나타나는 다중사용자 간섭 신호의 영향으로 인한 총 전송율이 한계점에 이르는 문제에 보다 나은 결과를 가짐도 확인할 수 있었다.

또한, 제안한 시스템의 적정한 사용자 수와 SNR을 기존의 MMSE RUB 시스템과의 비교를 통해 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] M. Sharif, and B. Hassibi, "On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information", *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. IT-51, No.2, pp.506-522, Feb. 2005.

[2] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multi-antenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.24, No.3, pp.528-541, Mar. 2006.

[3] M. Costa, "Writing on dirty paper", *IEEE Trans. Inform Theory*, Vol.29, No.5, pp.439-441, May. 1983.

[4] P. Lu, H. C. Yang and Y. C. Ko, "Performance enhancement of random unitary beamforming based multiuser MIMO systems with optimum combining", *Proc. of IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM'2008) New Orleans, LA, USA*, Nov. 2008.

[5] J. H. Winters, "Optimum combining in digital

mobile radio with cochannel interference", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, Vol.33, No.3, pp. 144-155, Aug. 1984.

[6] E. villier, "Performance analysis of optimum combining with multiple interferers in flat Rayleigh fading", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 47, No.10, pp.1503-1510, Oct. 1999.

박 성 호 (Seong-Ho Park)

준회원



2007년 8월 고려대학교 전기 전자전파공학부 학사
2008년 3월~현재 고려대학교 통신시스템기술협동과정 석박사통합과정
<관심분야> 전자공학, 통신공학

박 기 흥 (Ki-Hong Park)

정회원



2005년 2월 고려대학교 전기 전자전파공학부 학사
2005년 3월~현재 고려대학교 전자전기공학과 석박사 통합 과정
<관심분야> 전자공학, 통신공학

이 진 희 (Jinhee Lee)

정회원



2004년 8월 고려대학교 전기 전자전파공학부 학사
2006년 8월 고려대학교 전자 컴퓨터공학과 석사
2007년 3월~현재 고려대학교 전자전기공학과 박사과정
<관심분야> 전자공학, 통신공학

고 영 채 (Young-Chai Ko)

종신회원



1997년 2월 한양대학교 전자
통신공학과 학사

1999년 5월 University of Minne-
sota, Minneapolis, USA, 전
자 공학과 석사

2001년 10월 University of
Minnesota, Minneapolis,
USA, 전자 공학과 박사

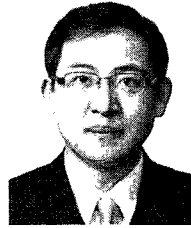
2004년 3월 고려대학교 전자컴퓨터학과 조교수

2008년 3월~현재 고려대학교 전자컴퓨터학과 부교수

<관심분야> 전자공학, 통신공학

김 성 진 (Sung-Jin Kim)

정회원



1994년 2월 한양대학교 전자
통신공학과 학사

2000년 2월 한양대학교 전자
통신공학과 석사

1994년 2월~현재 삼성종합기
술원 통신연구소

<관심분야> 복잡도가 높은 스마트그리드, 헬스케어
를 위한 저전력 무선통신