

# 정규화된 결합 공간 분할 다중화 기법의 제한된 피드백 환경에서 성능 분석

## Limited Feedback Performance Analysis of Regularized Joint Spatial Division and Multiplexing Scheme

송창익\*

Changick Song\*

### Abstract

The massive MIMO system, which is a core technology of 5G communication systems, has a problem that it is difficult to implement in a frequency division duplex system based on limited channel feedback because a large amount of channel information is required at the transmitting end. In order to solve this problem, the Joint Spatial Division and Multiplexing (JSDM) technique that dramatically reduces the channel information requirement by removing interference between the user groups using channel correlation information that does not change for a long time has been proposed. Recently, a regularized JSDM technique has been proposed to further improve performance by allowing residual interference between the user groups. However, such JSDM-related studies were mainly designed to focus on inter-group interference cancellation, and thus performance analysis was not performed in a more realistic environment assuming limited feedback in the intra-group interference cancellation phase. In this paper, we analyze the performance of the JSDM and regularized JSDM techniques according to the number of groups and users in a limited feedback environment, and through the simulation results, demonstrate that the regularized JSDM technique shows a more remarkable advantage compared to the existing JSDM in a limited feedback environments.

### 요약

5G통신의 핵심 기술인 거대다중안테나 시스템은 송신단에서 많은 양의 채널정보가 필요하기 때문에 제한된 채널 피드백을 사용하는 주파수 분할 이중 시스템에서 구현이 어려운 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 장시간 변하지 않는 채널 상관도 정보를 이용하여 단말 그룹 간 간섭을 제거함으로써 채널정보 요구량을 비약적으로 감소시키는 Joint Spatial Division and Multiplexing(JSDM)기법이 제안되었고, 최근에는 그룹 간 잔여 간섭을 허용함으로써 성능을 더욱 향상시키는 정규화된 JSDM기법이 제안된 바 있다. 하지만 기존 JSDM관련 연구들은 주로 그룹 간 간섭제거에 초점을 두고 설계되었기 때문에, 그룹 내 간섭 제거 단계에서 제한적인 피드백을 가정한 보다 실제적인 환경에서 성능분석이 이루어지지 못하였다. 본 논문에서는 JSDM기법과 정규화된 JSDM기법을 제한된 피드백 환경에서 그룹 수와 그룹 내 사용자 수에 따른 성능을 분석하고 시뮬레이션 결과를 통해 정규화된 JSDM기법이 제한된 피드백 환경에서 기존 JSDM대비 더욱 두드러지는 이득을 보임을 입증한다.

*Key words : Massive MIMO, Joint spatial division and multiplexing, Regularized JSDM, Limited feedback*

\* Associate Professor, Dept. of Electronic Engineering, Korea National University of Transportation

★ Corresponding author

E-mail : c.song@ut.ac.kr, Tel : +82-43-841-5363

※ Acknowledgment

Manuscript received, Aug. 18, 2021; revised. Sep. 3, 2021; accepted, Sep. 7, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The research was supported by a grant from the 2020 program for visiting professors overseas in Korea National University of Transportation

### I. 서론

최근 5G통신을 위한 핵심 요소 기술로써, 매우 많은 수의 송신안테나를 이용하여 기존 LTE(Long Term Evolution)주파수 자원의 포화를 극복하고 높은 데이터 요구량을 추종시킬 수 있는 Massive Multi-input Multi-output(MIMO)시스템이 큰 주목을 받고 있다.

Massive MIMO시스템의 한 가지 문제점은 송신단에서 필요한 채널정보량이 많기 때문에 LTE와 같이 제한된 채널정보 피드백을 기반으로 하는 FDD(Frequency Division Duplexing)시스템에서 구현이 어렵다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 최근 JSDM(Joint Spatial Division and Multiplexing) 빔포밍 기법이 제안되었다<sup>[1]</sup>.

JSDM은 사용자가 겪는 채널의 산란(scattering) 특성에 따라 동일한 산란 특성을 사용자들을 그룹으로 묶어서 관리함으로써 FDD환경에서 빔포밍에 필요한 채널정보의 피드백량을 비약적으로 줄이는 기법이다. JSDM은 일반적으로 두 단계 빔포밍으로 이루어지는데, 전 단계 빔포밍은 채널의 상관성에 따라 결정되는 채널의 공분산행렬 정보를 이용하여 그룹간의 간섭을 제거하며, 후 단계 빔포밍은 순시적 채널정보를 이용하여 그룹 내 사용자들 간의 간섭을 제거하는 목적으로 설계된다. 채널공분산은 비교적 오랜 시간 동안 변하지 않는 값으로 일반적으로 송수신단에서 큰 오버헤드 없이 측정 가능하기 때문에, 그룹 간 간섭은 전 단계 빔포밍에 의해 손쉽게 제거될 수 있다. 따라서 JSDM은 기존 massive MIMO시스템을 각 그룹별 소규모 사용자들을 독립적으로 지원하는 여러 개의 일반 MIMO 채널로 간주함으로써 송신단에서 필요한 채널정보의 양을 비약적으로 줄인다.

최근 이러한 JSDM기법의 성능 향상을 위해, 그룹 간 간섭을 어느 정도 허용하면서 사용자들의 전송률합(sum-rate)을 향상시킬 수 있는 정규화된 JSDM기법이 제안되었다<sup>[2]</sup>. 하지만 이 연구는 여전히 후 빔포밍(혹은 그룹 내 간섭제거) 단계에서 송신단의 완벽한 채널정보를 가정하고 있기 때문에 제한적인 피드백 환경에서 추가적인 분석이 필요하다. 본 논문에서는 JSDM기법과 정규화된 JSDM기법의 제한된 피드백 환경에서 그룹 수와 그룹 내 사용자 수에 따른 성능을 분석하고 시뮬레이션 결

과를 통해 정규화된 JSDM기법이 제한된 피드백 환경에서 더욱 두드러지는 성능이득을 얻을 수 있음을 입증한다.

논문 전체에서 굵은 영문 대문자는 행렬, 굵은 영문 소문자는 벡터, 그리고 일반 영문은 스칼라 값을 나타낸다.

### II. 시스템 모델

그림 1과 같이 이 논문에서 우리는 다중사용자 FDD 환경에서 다수의  $N_T$ 개 안테나를 가지고 있는 기지국(송신단)이 단일 안테나를 갖는 다수의 S개 단말(수신단)과의 통신을 지원하는 시스템을 고려한다. 기지국은 S개의 수신기로 전송되는 메시지 신호 벡터  $\mathbf{s} \in C^{S \times 1}$ 를 생성하고 채널정보를 이용하여 빔포밍을 수행하여 아날로그 송신신호  $\mathbf{x} = \mathbf{F}\mathbf{s} \in C^{N_T \times 1}$ 를 전송하며, 이 때 빔포밍 행렬  $\mathbf{F} \in C^{N_T \times K}$ 는 기지국 송신전력 제한조건  $Tr(\mathbf{F}\mathbf{F}^H) \leq P_T$ 을 만족하도록 설계되어야 한다.

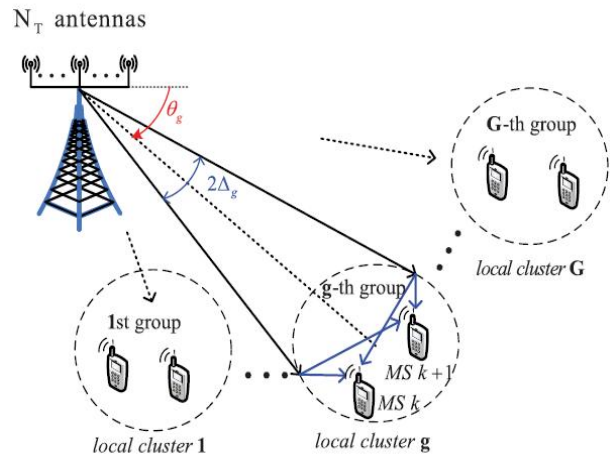


Fig. 1. JSDM downlink communication model in one-ring scattering channel environment.

그림 1. One-ring 산란 채널환경에서 JSDM 하향링크 통신 모델<sup>[2]</sup>

이후 각 k번째 단말은 아래와 같은 신호를 수신한다.

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}_k^T \mathbf{x} + n_k$$

여기서  $\mathbf{h}_k \in C^{N_T \times 1}$ 는 기지국으로부터 k번째 단말까지의 채널 벡터를 나타내며  $n_k \sim CN(0, \sigma^2)$ 는 k번

제 단말에서 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 가우시안 열잡음을 나타낸다. 각 단말은 하향 혼련신호를 통해 본인의 채널정보  $\mathbf{h}_k$ 를 정확하게 안다고 가정하고 송신단은 단말이 피드백 해주는 제한적인 정보만을 알 수 있다고 가정한다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 one-ring 산란 채널 모델<sup>[3]</sup>을 고려하며 이 때  $g$ 번째 산란 그룹 채널의 공분산 행렬  $\mathbf{R}_g$ 의  $(m,n)$  번째 값은 아래와 같이 결정된다.

$$[\mathbf{R}_g]_{m,n} = \frac{1}{\Delta_g} \int_{\theta_g - \Delta_g}^{\theta_g + \Delta_g} e^{j2\pi D(m-n)\sin\theta/\lambda_c} d\theta$$

for  $g=1, \dots, G$

여기서  $\theta_g$ 와  $\Delta_g$ 는 각각  $g$ 번째 그룹에서 신호의 수평 입사각(azimuth angle)과 확산각도(angular spread)를 나타낸다. 따라서 총  $K$ 개의 단말 중  $g$ 번째 그룹에 속하는  $k$ 번째 단말의 채널은  $\mathbf{h}_{g,k} = \mathbf{R}_g^{1/2} \mathbf{z}_{g,k}$ 과 같이 표현 가능하며 여기서  $\mathbf{z}_{g,k}$ 는 Rayleigh fading을 가정하여 평균이 0이고 분산이 1인 가우시안 랜덤변수로 모델링한다.  $\mathbf{R}_g$ 의 rank는  $r_g$ 로 주어지며 이 값은 채널에 의해 결정되는 제어가 불가능한 값이다. 이 때 비교적 작은 고유값들을 무시할 경우 effective rank를  $r_g^* \leq r_g$  정의할 수 있으며 이때  $r_g^*$ 는 시스템 설계자에 의해 조정될 수 있다.

앞서 살펴본 바와 같이  $g$ 번째 그룹의 각 단말은 순시적 채널 값은 다르지만 동일한 공분산 행렬  $\mathbf{R}_g$ 를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 공분산 행렬은 비교적 오랜 시간동안 변하지 않기 때문에 측정을 위해 소모되는 오버헤드가 매우 작으므로 송수신단 모두 알고 있다고 가정한다. JSDM(정규화된 JSDM 포함)은 이러한 공통 공분산 행렬을 이용하여 손쉽게 그룹 간 간섭을 제거한다.

### III. 기존 JSDM 빔포밍

JSDM에서 빔포밍 행렬은  $\mathbf{F} = \mathbf{Q}\mathbf{V}$ 와 같이 그룹간 간섭제거를 위한 전-빔포밍 행렬  $\mathbf{Q} \in \mathbb{C}^{N_T \times B_g}$ 와 그룹 내 간섭을 제거하는 후-빔포밍 행렬  $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{B_g \times K_g}$ 의 두 단계로 이루어진다. 이 때  $K_g$  ( $K_1 + \dots + K_G = S$ )는  $g$ 번째 그룹 내 단말의 개수를 의미하며  $B_g$ 는  $K_g \leq B_g \leq r_g^*$ 와  $\sum_{g=1}^G B_g = B \leq N_T$ 의 범위에서 결정되

는 시스템 파라미터이다.

전-빔포밍 행렬  $\mathbf{Q}$ 는 Blockwise Diagonal (BD)<sup>[4]</sup> 방식을 따라  $\mathbf{Q} = [\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_G]$ 와 같이  $G$ 개의 부행렬로 구성되며 각 부행렬  $\mathbf{Q}_g$ 는  $g$ 번째 그룹을 제외한 나머지 그룹들의 공분산, 즉  $\mathbf{R}_1, \dots, \mathbf{R}_{g-1}, \mathbf{R}_{g+1}, \dots, \mathbf{R}_G$ 의 영공간 벡터들로 구성할 수 있다. 이 때  $B_g$ 의 값이 비교적 작게 설정되었다면 그룹 간 간섭이 완전히 제거되는 효과를 얻을 수 있으나,  $B_g$ 의 값이 비교적 크게 설정된다면  $r_g^*$ 의 값 수준에 따라 그룹간의 간섭이 크게 증가할 수 있다.

### IV. 정규화된 JSDM 빔포밍

정규화된 JSDM 빔포밍 기법은 여전히 두 단계 빔포밍 형식을 따르지만 기존 JSDM과 달리 그룹 간 간섭제거 단계에서 BD를 사용하는 대신 정규화된 BD(RBD: Regularized BD)방식을 사용한다. RBD방식은 간섭을 직접적으로 제거하지 않고 각 단말에서 수신하는 신호와 특정 목적 신호의 mean squared error(MSE)가 최소화 되도록 간섭제거 행렬  $\mathbf{Q}$ 를 설계한다는 측면에서 가장 큰 차이가 있다. 정규화된 빔포밍 행렬  $\mathbf{Q}$ 를 유도하는 자세한 과정은 [2]에서 잘 설명되었기에 본 논문에서는 생략한다.

### V. DFT코드북 기반 JSDM

기존의 JSDM연구는 그룹 간 간섭제거를 위한 빔포밍 행렬  $\mathbf{Q}$ 를 찾는 것에 주로 집중하였기 때문에 이후 그룹 내 간섭제거를 위한 빔포밍 행렬  $\mathbf{V}$ 를 실제 제한된 피드백 환경에서 흔히 활용되는 코드북 기반 빔포밍 벡터로 설계하였을 경우 나타나는 보다 실제적인 성능 비교 분석이 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 그룹 내 간섭제거를 위한 빔포밍 행렬  $\mathbf{V}$  설계를 위해 Discrete Fourier Transform (DFT) 행렬을 기반으로 한 코드북을 사용하였고 각 사용자는 코드북 내 코드워드 벡터와 채널의 내적 값이 가장 큰 코드워드를 선택하여 그 index를 송신단으로 피드백한다. 이후 송신단은 수신한 index의 codeword들을 이용하여 채널 행렬을 재구성한 후 zero-forcing (ZF) 빔포밍<sup>[5]</sup>을 수행한다.

VI. 시뮬레이션 결과

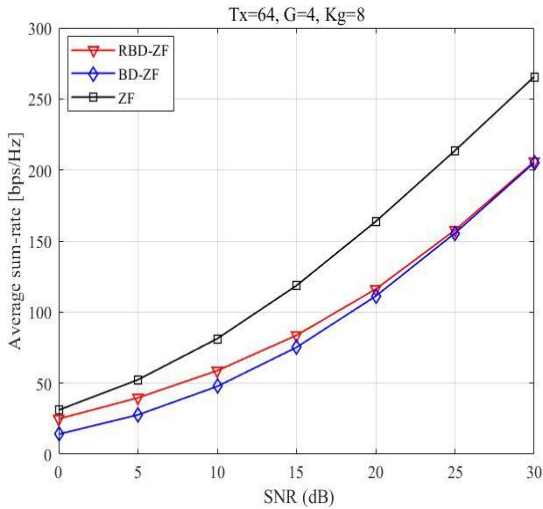


Fig. 2. Sum-rate performance comparison in an ideal environment where the transmitter knows all channel state information (CSI).

그림 2. 송신단이 모든 채널정보를 알고있는 이상적인 환경에서 sum-rate 비교

이 단락에서 우리는 다양한 JSDM 기법들 간의 성능을 비교 분석한다. 모든 그림에서 신호대잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)는  $P_T/\sigma^2$ 로 정의하였고 기지국은 총  $N_T=64$ 개의 균일 선형 배열(ULA: Uniform Linear Array) 안테나를 갖고 모든 단말 그룹에서 산란각은 10으로 가정하였다. 기지국과 사용자 사이의 무선채널은 Rayleigh fading 모델을 가정하였고 각 사용자별로 총 1만개의 채널을 독립 동형 가우시안 랜덤분포  $CN(0,1)$ 를 따라 생성한 후 각 순시채널에서 사용자별 최대 전송률의 합 즉 sum-rate을 계산한 후 그 평균치를 분석하였다. 각 순시채널에서  $g$ 번째 그룹의  $k$ 번째 사용자의 sum-rate은 아래와 같은 수식으로 계산된다.

$$\sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^{K_g} \log_2(1 + SINR_{g,k})$$

이때  $SINR_{g,k}$ 는  $g$ 번째 그룹의  $k$ 번째 사용자의 신호간섭및잡음비(SINR: Singal to Interference plus Noise Ratio)를 나타내며 아래의 수식과 같이 계산된다.

$$SINR_k = \frac{|h_{g,k}^H Q_g V_{g,k}|^2}{\sigma^2 + \sum_{(c,j) \neq (g,k)} |h_{g,k}^H Q_c V_{c,j}|^2}$$

그림 2는 송신단에서 모든 채널정보를 알고 있는 이상적인 환경에서 성능을 비교한 그래프이다. 여기서 BD-ZF는 기존 JSDM에서 그룹 간 간섭을 제거하고, 후 빔포밍 단계에서 ZF빔포밍<sup>[5]</sup>을 적용하였음을 나타내고 RBD-ZF는 정규화된 JSDM에서 후 빔포밍을 ZF빔포밍으로 적용하였음을 나타낸다. 하이픈이 없는 ZF는 그룹 간 간섭제거 없이 바로 ZF빔포밍을 수행한 것을 나타내는 것으로 가장 많은 채널정보량과 계산량을 요구한다. 총 그룹 수는  $G=4$ , 그룹당 단말 수는  $K_g=8$ , 총 단말의 수는  $K=32$ 를 가정하였다. 가장 먼저 JSDM기법이 그룹 간 간섭을 제거하는 과정에서 채널의 자유도를 감소시키기 때문에, 단말 간 간섭 제어에만 초점을 둔 기존 빔포밍 기법 대비 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 한편 정규화된 JSDM 즉 RBD-ZF와 기존 JSDM 즉 BD-ZF 둘을 비교해 보면 full CSI환경에서 정규화된 JSDM이 주로 낮은 SNR영역에서 이득을 얻는 것 알 수 있다.

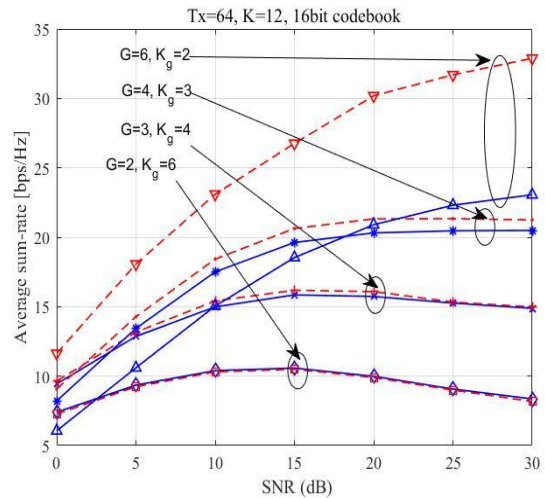


Fig. 3. Performance comparison of conventional JSDM and regularized JSDM in a limited feedback environment (solid blue line: conventional JSDM, red dashed line: normalized JSDM).

그림 3. 실제 제한적인 피드백 환경에서 기존 JSDM과 정규화된 JSDM성능 비교(파란색 실선: 기존 JSDM, 빨간색 점선: 정규화된 JSDM)

그림 3은 제한된 피드백 환경에서 기존 JSDM과 정규화된 JSDM의 성능을 비교하였다. 총 단말의 개수는  $K=12$ 로 유지하였고 후 빔포밍 단계에서 16 비트 DFT 코드북 방식을 사용하였다. 앞서 송신단의 Full CSI환경과 다르게 제한된 피드백 환경에서

는 모든 SNR영역에서 정규화된 JSDM기법이 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 그룹의 수 (G)가 증가하고 각 그룹별 단말의 수가 작아질수록 정규화된 JSDM기법의 이득이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 기존의 JSDM의 경우 그룹이 많아질수록 그룹 간 간섭 제거에 불필요하게 많은 자원을 소모하는 반면 정규화된 JSDM은 이러한 자원 소모를 최소화하기 때문이다.

## VII. 결론

이 논문에서는 JSDM기법과 정규화된 JSDM기법의 제한된 피드백에서 sum-rate성능을 분석하였다. 송신단에서 모든 채널정보를 알고 있는 이상적인 환경에서는 정규화된 JSDM기법이 기존 JSDM 대비 낮은 SNR영역에서만 이득이 제한되었던 반면 실제 제한적인 피드백 환경에서는 정규화된 JSDM기법이 모든 SNR영역에서 고른 이득을 보이며 특히 그룹 수가 적고 그룹 당 사용자 수가 많을수록 이득이 더욱 두드러짐을 입증할 수 있었다.

## References

- [1] A. Adhikary, J. Nam, J. -Y. Ahn and G. Caire, "Joint Spatial Division and Multiplexing-The Large Scale Array Regime," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.59, no.10, pp.6441-6463, 2013. DOI: 10.1109/TIT.2013.2269476
- [2] Y. Jeon, C. Song, S. -R. Lee, S. Maeng, and J. Jung, and I. Lee, "New Beamforming Design for Joint Spatial Division and Multiplexing in Large-Scale MISO Multi-User Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.16, no.5, pp.3029-3041, 2017. DOI: 10.1109/TWC.2017.2673845
- [3] D. Shiu, G. Foschini, M. Gans, and J. Kahn, "Fading Correlation and Its Effect on The Capacity of Multielement Antenna Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol.48, no.3, pp.502-513, 2000. DOI: 10.1109/26.837052
- [4] Q. H. Spencer, A. Lee, Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-Forcing Methods for Downlink Spatial Multiplexing in Multiuser MIMO Channels,"

*IEEE Trans. Sig. Process.*, vol.52, no.2, pp.461-471, 2004. DOI: 10.1109/TSP.2003.821107

[5] 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, 2005.

DOI: 10.1109/TCOMM.2004.840638

[6] Q. Shi, M. Razaviyayn, Z. -Q. Luo, and C. He, "An Iteratively Weighted MMSE Approach to Distributed Sum-Utility Maximization for A MIMO Interfering Broadcast Channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.7, no.12, pp.4792-4799, 2008. DOI:10.1109/ICASSP.2011.5946304

## BIOGRAPHY

**Changick Song** (Member)



2007 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.

2012 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

2013~2014 : Postdoctoral Research Associate, Imperial College London.

2014~2018: Assistant Professor, Korea National University of Transportation

2018~present: Associate Professor, Korea National University of Transportation