

논문 2014-51-6-4

다중 입출력 시스템의 부분적 채널 정보 궤환을 통한 빔포머 형성 방안

(A Beamformer Construction Method Via Partial Feedback of Channel
State Information of MIMO Systems)

김 윤 수*, 성 원 진**

(Yoonsoo Kim and Wonjin Sung[©])

요 약

LTE-A (Long Term Evolution-Advanced) 이후 무선 통신 시스템에서는, 시스템 전송률의 향상을 위해 증가한 개수의 입출력 안테나를 사용하는 MIMO (multiple-input multiple-output) 시스템이 활용될 것이다. 이러한 증가한 개수의 안테나 어레이를 사용하는 경우, 채널 정보의 궤환에 있어서 과도한 오버헤드가 문제가 될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 상황에서 채널 정보의 궤환 오버헤드를 줄이기 위한 방안과, 특히 수신단에서 두 개 혹은 그 이상의 수신 안테나를 사용하는 다중 랭크 전송시의 적용 방안을 제안한다. 수신단에서 송신단으로 일시에 궤환되는 정보의 양을 줄이기 위해 안테나 어레이를 분할하여 추정하는 채널을 기반으로 특이값 분해 (SVD, Singular Value Decomposition)를 활용하는 빔포밍 방안을 제시한다. SVD의 연산 과정의 특성 상, 분할된 행렬에 대한 SVD 연산은 원 행렬의 특성을 상실시킬 수 있으므로 이에 대한 대응 방안에 대해서도 설명한다.

Abstract

For wireless communication systems of (and beyond) LTE-Advanced, multiple-input multiple-output (MIMO) with an increased number of antennas will be utilized for system throughput improvement. When using such an increased number of antenna, an excessive amount of overhead in channel state information (CSI) feedback can be a serious problem. In this paper, we propose methods which reduce the CSI feedback overhead, particularly including application strategies for multi-rank transmission targeted for two or more reception antennas. To reduce the information which is instantaneously transmitted from the reception node to the transmission node, we present a beamforming method utilizing singular value decomposition (SVD) based on channel estimation of partitioned antenna arrays. Since the SVDs for partial matrices of the channel may lose the characteristics of the original unpartitioned matrix, we explain an appropriate scheme to cope with this problem.

Keywords : MIMO, beamforming, channel state information, feedback, codebook, SVD.

* 학생회원, ** 평생회원, 서강대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

© Corresponding Author(E-mail: wsung@sogang.ac.kr)

※ 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

접수일자: 2014년02월10일, 수정일자: 2014년05월09일
수정완료: 2014년05월28일

I. 서 론

4세대 이동통신 시스템에서는 다수개의 송신 및 수신 안테나를 사용하는 MIMO 시스템이 도입되어 활용되고 있다.^[1] 이로 인해 데이터 전송률의 증가가 이뤄졌고 향후 차세대 이동통신 시스템에서는 송신 안테나의

개수가 더 큰 규모로 증가할 전망이다. 이러한 MIMO가 도입된 LTE 시스템에서는 안테나 간 형성된 채널을 추정하기 위해 매 서브프레임에 CSI-RS (Channel State Information-Reference Signal)를 활용한다.^[2] 이를 통해 수신단에서는 형성된 채널 정보를 획득하고 PMI (Precoding Matrix Indicator), CQI (Channel Quality Indicator), RI (Rank Indicator) 등의 채널 정보를 송신단으로 귀환하게 된다.^[3] 전송률 향상을 위해 물리적 안테나 원소 수가 증가될 경우, 채널 추정을 위한 파일럿 심볼의 수가 증가될 수밖에 없다.^[4] 이에 따라, 서브프레임에 할당되는 CSI-RS의 수가 증가하고, 송신단으로 채널 정보를 귀환할 시 소요되는 귀환 자원의 양 또한 증가하게 된다.^[5] 반면 제한된 귀환 자원을 소요하기 위해서는 채널 정보의 정확도가 감소하게 된다.^[6]

본 논문에서는 4개 이상, 다수의 안테나 어레이를 사용하는 송신단과 두 개 이상의 안테나를 사용하는 수신단에서 이뤄지는 멀티 랭크 전송에 있어서, LTE-Advanced를 기반으로 한 이동 통신 시스템이 효율적으로 동작하기 위한 방식들을 제안한다. 채널 정보를 여러 서브프레임에 걸쳐 나눠 전송하여 리소스 블록에 할당되는 CSI-RS의 수를 줄이고,^[7] 위상 측면에서 채널 정보를 그대로 양자화하여 귀환하는 방법과 특이값 분해를 통한 채널의 구성 성분을 귀환하여 채널 정보를 추정하는 방식을 제안한다. 또한 기지국이 송신 빔포밍을 수행하기 위해 사용되는 빔포밍 행렬을 단말이 직접 구성하여 귀환하는 방법으로, 단말이 분할된 채널 행렬을 누적해서 우선 전체 채널 행렬로 확장하여 특이값 분해를 통한 빔포밍 행렬을 획득한 후 이를 양자화 하여 귀환하는 방식을 제안한다. LTE-Advanced 시스템에서는 채널 정보의 일환으로 PMI를 귀환하는데, 이는 코드북을 기반으로 한 인덱스를 귀환하는 방식이다. 따라서 각 제안 방식에서 귀환되는 정보들은 PMI를 통해 귀환될 수 있으므로 기존의 이동 통신 시스템에 또한 적용할 수 있으며, 다중 코드북을 이용한 채널 추정의 정확도 향상 등의 기존 연구 결과와 결합 또한 가능하다.^[8]

본 논문의 II장에서는 신호 및 시스템 환경을 소개하고 III장에서는 제안 방식들을 소개한다. IV장에서는 제안 방식들의 성능 평가가 이뤄지며 V장에서 결론을 맺는다.

II. 신호 및 시스템 모델

N 개의 수신 안테나를 갖는 단일 사용자가 M 개의 송신 안테나 원소를 갖는 기지국으로부터 받는 신호 벡터 \mathbf{y} 는

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있으며, $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1^T, \dots, \mathbf{h}_N^T]^T$ 는 하향 링크 채널 행렬을 나타내며, $\mathbf{h}_n = [h_{n1}, \dots, h_{nM}]$ 는 n 번째 수신안테나에 대한 채널 벡터로써, 원소는 M 개의 평균 전력이 1로 정규화 된 독립 동일 분포의 복소 가우시안 변수이다. $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_N]$ 는 빔포밍 행렬로서, 각각의 $\mathbf{w}_n = [w_{n1}, \dots, w_{nM}]^T$ 는 M 개의 송신 안테나의 빔포밍 벡터이다. $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_M]^T$ 는 송신되는 데이터 벡터를 나타내며 $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_N]^T$ 은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 부가 백색 가우스 잡음 (Additive White Complex Gaussian Noise; AWGN) 벡터를 나타낸다. 채널 행렬 \mathbf{H} 는 특이값 분해에 의해

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H \quad (2)$$

로 나타낼 수 있으며, \mathbf{U} 는 $N \times N$ 차원의 좌특이 행렬, \mathbf{V} 는 $M \times M$ 차원의 우특이 행렬로서 각각은 유니터리 행렬이고, $\mathbf{\Sigma}$ 는 행렬의 랭크 별 특이값을 나타내는 $N \times M$ 차원의 대각 행렬이다.

단일 기지국이 단일 사용자에 대해 전송하는 경우에 대해 수신 전력을 성능 지표로 하였을 때, 단일 사용자가 갖는 수신 전력을 평균 상관 전력 μ 로 정의하여

$$\mu = E \left[\sum_{i=1}^R |a_{(i,i)}|^2 \right], \text{ (where } a_{(i,i)} \in \mathbf{A} \text{ and } \mathbf{A} = \mathbf{U}^H \mathbf{H} \mathbf{W} \text{)} \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 이 때, R 은 전송 랭크를 나타내고 \mathbf{U} 는 단말에서 이뤄지는 신호처리 행렬로써, 멀티 랭크 전송의 경우 식 (2)의 \mathbf{U} 와 동일하며, \mathbf{W} 는 단말과 기지국 간 귀환 정보가 완벽하다고 했을 때, 식 (2)의 \mathbf{V} 와 동일하게 된다. 또한 채널 상태나 환경 등에 따라서 전송 랭크를 제한하여 송·수신하는 방법도 가능한데, 이는 \mathbf{U} 와 \mathbf{W} 의 송·수신 빔포밍 행렬에서 좌측으로부터 전송하고자 하는 랭크에 해당하는 수의 벡터들을 선택하여 송·

수신 빔포밍을 수행한다.^[9]

PMI 제한을 통해 전송되는 인덱스 i^* 는

$$i^* = \operatorname{argmax}_i \{ |h w_i|^2 \} \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있으며 이 때 w_i 는 주어진 코드북 내의 코드벡터를 나타낸다. 또한 벡터 h 는 일반적으로 채널 벡터를 나타내지만, 빔포밍 시 사용되는 전처리 행렬이나 후처리 행렬 등의 위상에 대해 양자화되는 임의의 다른 벡터가 될 수 있다.

성능 비교에서 사용된 코드북은 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 심볼 $\{1, -1, j, -j\}$ 로 구성된 코드 벡터의 모든 조합을 포함한 코드북이며 표준에 정의된 기존의 LTE 코드북^[10]에서와 같이, 첫 원소는 1로 고정되어 있고 나머지 송신 안테나에 대한 코드 벡터의 원소들이 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 그리고 270° 의 위상을 나타낸다. 따라서 M 개의 송신 안테나에 대해 코드북이 갖는 코드 벡터의 수는 4^{M-1} 이 된다.

다수의 기지국과 사용자가 존재하는 환경의 경우, 사용자는 다른 기지국으로부터 간섭신호를 포함하여 수신 신호를 받게 된다. 이에 따라 k 번째 사용자는 받는 수신 신호 벡터 y_k 는

$$y_k = H_k W_k x_k + \sum_{i \neq k} H_k W_i x_i + z_k \quad (5)$$

와 같이 식 (1)로부터 확장하여 나타낼 수 있으며, K 개의 기지국 중에서 l 번째의 서빙 기지국을 제외한 나머지 기지국의 신호원이 간섭신호로 적용된다. 각각의 벡터와

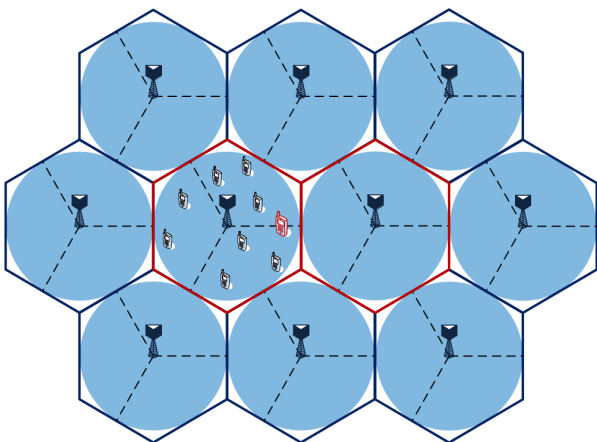


그림 1. 멀티셀 환경의 시스템 모델
Fig. 1. System model for Multi-cell.

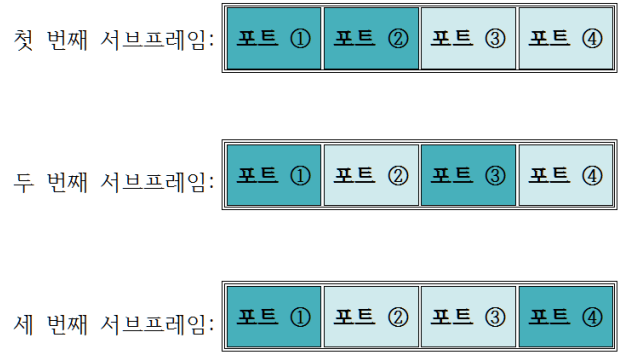


그림 2. $M = 4$ 과 $L = 2$ 일 때의 서브프레임 별 전송 안테나 그룹

Fig. 2. Transmitted antenna group per subframe for $M = 4$ and $L = 2$.

행렬은 식 (1)에서 정의한 바와 같다.

성능 평가를 위해 사용되는 시뮬레이션 환경은 단일 사용자 MIMO 시스템으로서 그림 1과 같이 멀티셀 환경을 고려하되 서빙 기지국과 그에 인접한 간섭 기지국 사이의 단일 사용자를 대상으로 성능 평가를 수행하였다. 사용자 분포는 서빙 기지국과 간섭 기지국 사이에 특정 위치에 존재하는 환경이다. 송신 빔포밍 적용 시 각 단말의 수신 신호 대 잡음비 (Signal-to-Interference Plus Noise Ratio; SINR) γ_k 는

$$\gamma_k = \frac{|H_k W_k|^2}{\sum_{i \neq k} |H_k W_i|^2 + z_k^2} \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 용량 공식을 적용한 사용자 전송률 r_k 는

$$r_k = \log_2(1 + \gamma_k) \quad (7)$$

와 같다.

III. 채널 추정 및 빔포밍 행렬 구성 방식

다중 랭크 전송에서 채널 추정 및 빔포밍 행렬 구성 방식들을 제안함에 있어서, 기지국은 서브프레임 당 M 개의 송신 안테나 중 부분적으로 L 개의 안테나 원소들에 대해 CSI-RS를 전송하여 총 $\lceil (M-1)/(L-1) \rceil$ 회 전송을 통해 전체 안테나 포트에 대한 채널을 단말이 추정하도록 한다. 그림 2는 송신 안테나의 개수가 4

개, 서브프레임 별 분할된 안테나 개수가 4개인 $M = 4$, $L = 2$ 인 환경에서 전송 되는 안테나 포트의 패턴을 보여준다. 그림에서도 확인할 수 있듯이 첫 번째 서브프레임에는 1번과 2번 안테나 포트의 채널 정보가 전송되며, 3회의 전송이 수행되면 단말은 전체 안테나 포트에 대한 채널 정보를 알 수 있다. 전체 송·수신 안테나에 대한 채널 행렬이

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \end{bmatrix} \quad (8)$$

과 같이 형성되었을 때 그림 2에 따라, 단말이 각 서브프레임에 전송 받는 채널은

$$\mathbf{H}^{(1)} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{H}^{(2)} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{13} \\ h_{21} & h_{23} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H}^{(3)} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{14} \\ h_{21} & h_{24} \end{bmatrix} \quad (9)$$

가 된다. 이하의 논의에서 전체 채널 행렬을 구성하는 서브프레임 기간에 대해서 채널이 시불변임을 가정한다.

기지국과 단말 간의 케환을 통해 추정 채널을 통해 빔포밍 행렬을 구성하고 특이값 분해를 기반으로 한 송신 빔포밍을 수행할 시 아래와 같은 채널 추정 및 빔포밍 행렬 구성 방식을 제안한다.

1. 부분 채널 케환 방식

기지국은 각 서브프레임에 분할된 안테나 포트에 대한 채널 정보를 전송하고, 단말이 각 서브프레임에 전송 받은 채널 정보를 그대로 케환하는 채널 추정 방식을 사용한다. 분할된 안테나 포트로부터 받은 채널 정보들에 대해 각 채널 원소들의 위상정보를 각각 양자화하여 기지국으로 케환하는 방식이다. 단말에서 분할된 안테나 포트의 채널 정보를 양자화하여 기지국으로 케환하면 기지국은 해당 프레임에 케환받은 분할된 채널 정보들을 누적하여 연결하는 방식으로 전체 채널을 추정하게 된다.

그림 2와 같은 $M = 4$, $L = 2$ 인 환경에서 단말이 두 개의 수신 안테나를 사용하는 경우, 단말은 각 서브프레임 마다 전송 받은 채널 행렬에 대해 양자화된 정보

$$\hat{\mathbf{H}}^{(1)} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & \hat{h}_{12} \\ \hat{h}_{21} & \hat{h}_{22} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{H}}^{(2)} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & \hat{h}_{13} \\ \hat{h}_{21} & \hat{h}_{23} \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{H}}^{(3)} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & \hat{h}_{14} \\ \hat{h}_{21} & \hat{h}_{24} \end{bmatrix} \quad (10)$$

를 즉각적으로 케환하며 기지국은 케환 받은 정보를 전체 채널 행렬 $\hat{\mathbf{H}}$ 을 추정한다. 따라서 기지국에서 추정된 채널은

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11} & \hat{h}_{12} & \hat{h}_{13} & \hat{h}_{14} \\ \hat{h}_{21} & \hat{h}_{22} & \hat{h}_{23} & \hat{h}_{24} \end{bmatrix} \quad (11)$$

이 된다.

전체 채널 정보의 추정이 완료되면 기지국에서는 다중 랭크의 빔포밍을 수행하여 전송하는데 빔포밍을 위한 코드벡터 구성은 추정된 채널 행렬 $\hat{\mathbf{H}}$ 의 특이값 분해의 결과인 우특이 행렬로 이루어진다. 우특이 행렬의 열벡터로 이루어진 코드벡터로 빔포밍을 수행하여 전송하면 단말에서는 실제 알고 있던 채널 정보를 가지고 특이값 분해의 결과인 좌특이 행렬을 이용하여 수신 신호 처리를 수행한다. II장에서 설명한 QPSK 코드북을 사용할 때, 부분 채널 케환 방식에서 서브프레임 당 소요되는 케환 자원의 비트 수는 $R \times 2(L-1)$ 이 된다.

2. 부분 특이값 케환 방식

채널 추정 방식의 일환으로, 기지국으로부터 파일럿을 통해 받은 채널 행렬의 구성 성분을 양자화 하여 이를 케환하는 방식과 케환된 정보를 통해 기지국이 채널을 추정하는 방법이다. 분할된 안테나 포트로부터 얻은 채널 행렬을 우선 단말에서 특이값 분해의 과정을 통해 채널 행렬의 구성 성분을 획득한 후 좌특이 행렬과 우특이 행렬에 해당하는 \mathbf{U} 와 \mathbf{V} 를 양자화 한다. j 번째 부분 채널 행렬의 $\mathbf{U}^{(j)}$ 와 $\mathbf{V}^{(j)}$ 의 각 원소를 위상에 대해 양자화 한 행렬을 각각 $\hat{\mathbf{U}}^{(j)}$ 와 $\hat{\mathbf{V}}^{(j)}$ 로 나타낼 때, 이를 기지국에 케환하도록 한다. 기지국에서는 이러한 채널의 구성 성분을 통해

$$\hat{\mathbf{U}}^{(j)} \hat{\Sigma}^{(j)} (\hat{\mathbf{V}}^{(j)})^H = \hat{\mathbf{H}}^{(j)} \quad (12)$$

의 과정에 의해 j 번째 부분 채널을 우선적으로 추정하게 된다. 이 때 좌특이 행렬 $\hat{\mathbf{U}}^{(j)}$ 의 경우 단말로부터 케환 받은 양자화된 행렬을 사용하는 것을 대신하여 본래의 특이값 분해로 얻어진 좌특이 행렬 \mathbf{U} 의 성질을 만족하는 임의의 직교 행렬을 사용하는 것 또한 가능하여 케환되

는 정보의 양을 절약할 수 있다. 전체 채널 행렬의 각 랭크 별 채널의 크기 상태를 나타내는 $\hat{\Sigma}^{(j)}$ 는 기존 제한 정보의 하나인 CQI (Channel Quality Indicator)를 사용하여 이 정보를 대체할 수 있으며, 이와 더불어 제한 받은 양자화 된 $\hat{\mathbf{V}}^{(j)}$ 를 통해 전송된 안테나 포트에 대한 부분 채널을 재구성하게 된다.

전체 송신 안테나 포트에 대해 위의 과정과 같이 채널 정보 획득이 끝나게 되면 각 부분 채널의 연결을 통해 전체 채널을 추정하게 된다. 채널 연결 시 기준이 되는 부분 채널을 선택하는 방법은 각 부분 채널을 재조립하는 과정에서 사용한 CQI를 바탕으로 채널 상태가 가장 우수한, 혹은 위상 정보가 가장 정확하다고 판단되는 부분채널이 기준채널로 선택되어 나머지 부분 채널을 연결한다. 또한 기준 채널을 제외한 나머지 부분 채널 연결 시 기준 채널을 통해 연결되는 안테나 포트들의 부분 채널의 위상들을 조정한다.

그림 2와 같은 $M = 4, L = 2$ 인 환경에서 단말이 두 개의 수신 안테나를 사용하는 경우, 세 번의 서브프레임에 대해 각각 제한되는 $\hat{\mathbf{U}}^{(j)}$, $\hat{\Sigma}^{(j)}$ 와 $\hat{\mathbf{V}}^{(j)}$ 를 통해 기지국이 각 서브프레임에 전송된 부분 채널을 추정하는 과정은

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{U}}^{(1)} \hat{\Sigma}^{(1)} (\hat{\mathbf{V}}^{(1)})^H &= \hat{\mathbf{H}}^{(1)} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11}^{(1)} & \hat{h}_{12}^{(1)} \\ \hat{h}_{21}^{(1)} & \hat{h}_{22}^{(1)} \end{bmatrix}, \\ \hat{\mathbf{U}}^{(2)} \hat{\Sigma}^{(2)} (\hat{\mathbf{V}}^{(2)})^H &= \hat{\mathbf{H}}^{(2)} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11}^{(2)} & \hat{h}_{12}^{(2)} \\ \hat{h}_{21}^{(2)} & \hat{h}_{22}^{(2)} \end{bmatrix}, \\ \hat{\mathbf{U}}^{(3)} \hat{\Sigma}^{(3)} (\hat{\mathbf{V}}^{(3)})^H &= \hat{\mathbf{H}}^{(3)} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11}^{(3)} & \hat{h}_{12}^{(3)} \\ \hat{h}_{21}^{(3)} & \hat{h}_{22}^{(3)} \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (13)$$

와 같으며 $\hat{\mathbf{H}}^{(1)}$, $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$ 와 $\hat{\mathbf{H}}^{(3)}$ 을 연결하여 전체 채널을 구성한다. 채널을 연결하는 과정에서 만일 두 번째 서브프레임에 전송된 부분 채널의 채널 상태가 가장 좋다고 판단되는 경우 연결한 채널은

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \hat{h}_{11}^{(2)} & \hat{h}_{12}^{(1)} & \hat{h}_{13}^{(2)} & \hat{h}_{14}^{(3)} \\ \hat{h}_{21}^{(2)} & \hat{h}_{22}^{(1)} & \hat{h}_{23}^{(2)} & \hat{h}_{24}^{(3)} \end{bmatrix}\quad (14)$$

가 된다. 앞서 설명한 바와 같이 채널을 연결하여 재조립하는 과정에서 위상 보정을 실시하는데 식 (12)에 대해 이 과정은

$$\begin{aligned}\angle \hat{h}_{12}^{(1)} &= \angle \hat{h}_{12}^{(1)} + (\angle \hat{h}_{11}^{(2)} - \angle \hat{h}_{12}^{(1)}), \\ \angle \hat{h}_{22}^{(1)} &= \angle \hat{h}_{22}^{(1)} + (\angle \hat{h}_{21}^{(2)} - \angle \hat{h}_{22}^{(1)}), \\ \angle \hat{h}_{14}^{(3)} &= \angle \hat{h}_{14}^{(3)} + (\angle \hat{h}_{11}^{(2)} - \angle \hat{h}_{14}^{(3)}), \\ \angle \hat{h}_{24}^{(3)} &= \angle \hat{h}_{24}^{(3)} + (\angle \hat{h}_{21}^{(2)} - \angle \hat{h}_{24}^{(3)})\end{aligned}\quad (15)$$

와 같고, 위상 보정까지 수행한 $\hat{\mathbf{H}}$ 이 기지국에서 전체 안테나 포트에 대한 최종적으로 추정된 채널이 된다.

위의 과정을 통해 기지국에서 송신 안테나와 수신 안테나 간에 형성되는 전체 채널 행렬을 추정한 후 이를 특이값 분해를 통해 빔포밍 행렬을 획득한다. 이 때 생성되는 빔포밍 행렬은 추정된 채널 행렬의 우특이 행렬을 통해 구성되어 송신 빔포밍이 수행된다. 구성된 빔포밍 행렬을 통해 송신 빔포밍을 수행하게 되면 단말에서는 마찬가지로 좌특이 행렬을 이용하여 수신 신호처리를 수행한다. QPSK 코드북을 사용할 때, 부분 특이값 제한 방식에서 서브프레임 당 소요되는 제한 자원 비트 수는 $R \times \{2(L-1) + 2(N-1)\}$ 이 되며, 송신단에서는 제한된 정보를 통해 채널을 재구성하는 과정을 필요로 하기 때문에 다른 제안 방식들에 비해 추가적인 복잡도가 요구된다.

3. 누적 특이값 제한 방식

단말이 기지국으로부터 분할된 송신 안테나의 채널 정보를 누적하여 전체 채널 행렬을 구성한 후 특이값 분해를 통해 송신 빔포밍을 수행하기 위한 행렬인 우특이 행렬을 양자화하여 제한하는 방식이다. 기지국과 단말이 분할된 안테나 포트를 통해 매 서브프레임마다 채널 추정을 수행할 때, 단말에서는 측정된 추정 채널 행렬들을 하나의 전체 행렬로 확장하여 구성하여 구성된 전체 행렬의 특이값 분해를 수행하여 송신 빔포밍에 사용된 우특이 행렬 \mathbf{V} 를 획득한 후 이를 위상에 대해 양자화하여 기지국으로 제한한다.

그림 2와 같은 $M = 4, L = 2$ 인 환경에서 단말이 두 개의 수신 안테나를 사용하는 경우, 단말은 각 서브프레임에 전송 받은 채널에 대해 세 번째 서브프레임, 즉 전체 채널 행렬을 모두 구성한 후 특이값 분해를 수행하여 우특이 행렬에 대해 양자화 된

$$\hat{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} \hat{V}_{11} & \hat{V}_{12} & \hat{V}_{13} & \hat{V}_{14} \\ \hat{V}_{21} & \hat{V}_{22} & \hat{V}_{23} & \hat{V}_{24} \end{bmatrix}^T\quad (16)$$

를 기지국으로 케환하게 된다.

기지국은 케환된 우퉁이 행렬 \hat{V} 을 빔포밍 행렬로 사용하여 송신 빔포밍을 수행하며 단말은 기지국으로부터 분할된 안테나 포트를 통해 이미 전체 채널 행렬 정보를 알고 있으므로 실제 채널 행렬의 특이값 분해의 결과인 좌특이 행렬을 통해 수신 신호처리를 수행하여 수신 안테나간의 간섭을 최소화한다. 설명한 바와 같이 누적 특이값 케환 방식의 경우 전체 안테나 포트에 대한 정보가 일시에 케환되며, 케환이 이루어지는 서브프레임에서 소요되는 케환 자원 비트 수는 $R \times 2(M-1)$ 이 된다.

IV. 성능 평가

성능 평가는 각 제안 방식 별 평균 상관 전력과 순간 전송률 두 가지 종류로 이루어진다. 평균 상관 전력은 식 (3)에 따라 단일 사용자에 대해 랭크 별 수신 신호의 전력 값을 합산하여 계산된다. 기지국의 송신 안테나 수와 분할되는 포트의 수는 그림 2와 같은 $M = 4$ 와 $L = 2$ 인 경우와 추가적으로 $M = 16$ 과 $L = 4$ 인 경우의 두 가지 환경을 고려하였으며, 단말은 $N = 2$ 의 수신 안테나를 사용하는 경우에 대해 성능 평가를 하였으며 그 결과는 표 1과 같다.

표 1에서 평가 항목 중 가장 상단에 위치한 ‘실제 채널 케환’은 양자화 오류 없이 이상적인 송신 빔포밍이 수행되었을 경우로서 성능의 상한을 나타낸다. 평균 상관 전력 측면에서 각 제안 방식 별 성능을 비교했을 경우 누적 특이값 케환 방식이 $M = 4$ 와 16일 때 모두 가장 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그러나 앞서 언급한 듯이 누적 특이값 케환 방식은 매

표 1. 평균 상관 전력 비교표

Table 1. Comparison table for average correlation power.

제안 방식	평균 상관 전력	
	$M = 4, L = 2$	$M = 16, L = 4$
실제 채널 케환	8.00	32.00
부분 채널 케환	4.95	15.93
부분 특이값 케환	5.22	13.36
누적 특이값 케환	6.16	21.16

표 2. 실험 파라미터

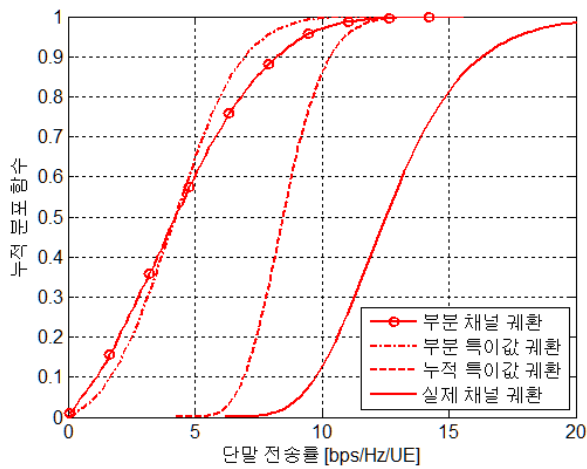
Table 2. Simulation parameters.

파라미터	값
셀 구조	2셀 2섹터
기지국 간 거리	500 m
사용자 분포	섹터 당 단일 사용자
경로 감쇄	ITU-R M.2135-1 UMa
페이딩	레이리 페이딩
중심주파수	2 GHz
안테나 높이	기지국: 25 m
	사용자: 1.5 m
안테나 수	기지국: 16
	사용자: 2

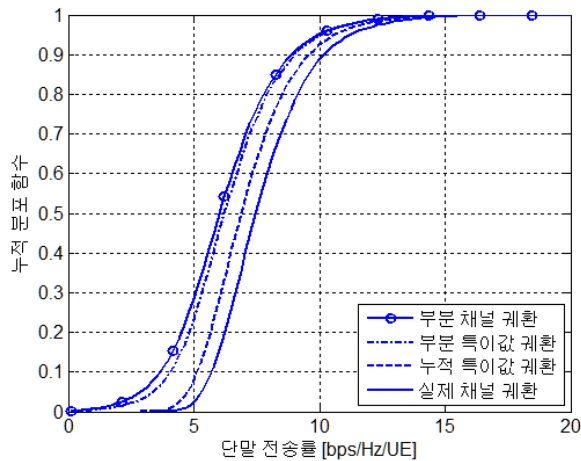
서브프레임마다 전송받은 안테나 포트에 대한 정보를 케환하는 것이 아닌, 모든 안테나 포트에 대한 전송이 이루어진 후에 일시에 정보를 케환하는 방식이므로 일회에 케환되는 정보의 양이 방대하다는 단점이 있다. 또한 서브프레임마다 해당 안테나 포트에 대해 즉각적인 케환이 가능한 나머지 두 방식을 비교하면, 송신 안테나 수가 적은 경우는 부분 특이값 케환 방식이, 많은 경우는 부분 채널 케환 방식이 각각 우수한 것으로 나타났다.

또한 단말의 수신 안테나 간 간섭의 영향과 사용자 간 간섭의 영향을 확인하기 위해 간섭 제한적인 환경에 대해 멀티셀 시스템 모델에서 제안 방식 별 성능 평가를 진행하였다. 전송 랭크는 송신 빔포밍과 수신 신호처리의 과정에서 사용되는 빔포밍 벡터의 수에 의해 전송이 수행되며, 진행된 실험에서는 채널 상태에 관계없이 고정된 랭크를 통해 전송을 수행한다. 자세한 실험의 파라미터는 표 2에서 확인할 수 있으며,^[11] 성능 평가를 위해 측정된 사용자는 실제 전송 받는 기지국으로부터 150m의 거리에 고정되어 위치해 있을 때, 단말의 순간 전송률의 누적 분포를 그림 3에서 나타내고 있다. 순간 전송률은 두 가지의 경우로 나누어 실험을 진행하였으며 기지국이 송신 시 전체 랭크를 사용하여 전송하는 경우와 단일 랭크로 제한하여 전송하는 경우에 대하여 각각 제안 방식 별로 성능 분석을 진행하였다.

평균 상관 전력에서의 경향성과 마찬가지로 각 제안



(a) 전체 랭크 사용 전송



(b) 단일 랭크 제한 전송

그림 3. 멀티셀 모델에서의 순간 전송률

Fig. 3. Instantaneous UE throughput for multi-cell model.

방식별 성능의 차이는 누적 특이값 제한 방식이 가장 우수하지만, 이는 수신 신호 전력과 간섭의 영향만을 반영하고 있으며, 평균 상관 전력 평가에서와 마찬가지로 서브프레임 별 채널 정보의 제한 여부와 그 정보의 양을 고려하였을 때 각 제안 방식별로 장단점이 존재함을 확인하였다.

V. 결론

다수개의 안테나 어레이를 사용하는 MIMO 시스템에서 다중 랭크를 사용한 전송 시 효율적인 채널 추정 방안 및 빔포밍 행렬 생성을 위한 몇 가지 방안들을 제

안하였다. 채널 추정에 소요되는 CSI-RS 또는 제한 자원의 양을 줄이기 위해 안테나를 분할하고, 특이값 분해를 기반으로 한 송·수신 빔포밍 수행 시 부분 행렬 정보를 전체 행렬 정보로 확장하기 위한 방식들을 제안하였다. 성능 평가에서는 위의 제안 방식들을 이동 통신 환경에서 분석하기 위한 평균 상관 전력과 시스템 모델에서의 단말 전송률을 각각 비교하였다. 성능 평가 부분에서 언급한 바와 같이 송신 및 수신 안테나의 개수와 서브프레임 별 안테나의 분할되는 개수 L 등의 환경을 적절히 고려한 제한 방식과 제한 정보의 양에 따라 제안 방식들이 선택적으로 사용될 수 있다.

REFERENCES

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Academic Press, 2011.
- [2] 3GPP, TR 36.814, "Further Advancements for E-UTRA:Physical Layer Aspects".
- [3] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE-The UMTS Long Term Evolution: From theory to practice*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2011.
- [4] F. Rusek, et. al. "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays." *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, 2012.
- [5] H. Huh, G. Caire, H. C. Papadopoulos, and S. A. Ramprasad, "Achieving 'Massive MIMO' spectral efficiency with a not-so-large number of antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 9, pp. 3226-3239, Sept. 2013.
- [6] R. W. Heath Jr., T. Wu, and A. C. K. Soong, "Progressive refinement of beamforming vectors for high-resolution limited feedback," *EURASIP J. Advances Signal Process*, article ID 463823, 13 pages, 2009.
- [7] J. Sung and W. Sung, "Large-scale MIMO beamforming using successive channel state estimation and codebook extension," in *Proc. 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2013*, London, UK, Sept. 08-11, 2013.
- [8] H. Kang, Y. KIM, and W. Sung, "Performance evaluation of MIMO systems utilizing channel interpolation and multiple codebooks," in *Proc. 2013 IEEE Fall Conference*, Seoul, Korea, Nov.

23, 2013.

- [9] M. Raja and P. Muthuchidambaranathan, "BER performance of SVD-based transmit beamforming with various modulation techniques," in *Proc. 2010 5th Int. Conf. Industrial and Information Systems, ICIIS 2010*, India, July 29-Aug. 01, 2010.
- [10] 3GPP, TR 36.211, "Physical Channels and Modulation (Release 11)"
- [11] ITU-R Report M.2135 - 1, *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced*, Dec. 2009.

저 자 소 개



김 윤 수(학생회원)
2013년 서강대학교
전자공학과 학사
2013년 ~현재 서강대학교
전자공학과 석사과정

<주관심분야 : 안테나 빔포밍, MU-MIMO, LTE-Advanced>



성 원 진(평생회원)
1990년 서울대학교
전자공학과 학사
1992년 University of Michigan
EECS 석사
1995년 University of Michigan
EECS 박사

1996년 1월~2000년 8월 Hughes Network
Systems 책임 연구원
2000년 9월~현재 서강대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 이동무선통신, MIMO>