

양자화 전송 중계 기반 분산 다중 안테나 통신 시스템

홍 비*, 최 완°

Distributed MIMO Systems Based on Quantize-Map-and-Forward (QMF) Relaying

Bi Hong*, Wan Choi°

요 약

이동 단말기에 다중 안테나를 장착하는 것은 단말기의 크기와 전력 소모 문제로 현실적인 어려움을 안고 있다. 본 논문에서는 셀룰러 네트워크에서 단일 안테나를 가지는 이동 단말기의 전송 용량 증대를 위해, 다중안테나 통신 (MIMO)을 통해서 얻을 수 있는 선형적인 전송 용량 증대를 달성하는 신호 중계 기반 분산 다중 안테나 기법을 제안하고 성능을 분석한다. 분산 다중안테나 시스템을 위한 단말 간 신호 중계에 증폭 후 전달 기법 (Amplify-and-Forward)을 사용할 경우에 비해 양자화 후 전달 (Quantize-Map-and-Forward) 기법을 사용하는 경우, 처리율 측면에서 보다 우수한 성능을 달성할 수 있음을 실험을 통해서 보인다. 또한, 선형적 전송 용량 증대폭을 보다 향상시키기 위해 양자화 후 전달 중계 방식을 활용하여 다중접속채널을 구성하는 방법을 제안하고, 이러한 다중접속채널 구성이 가능한 조건을 충족시키기 위한 단말기 선택을 가능하게 하는 후보 이동 단말기 수를 분석하였다. 이러한 분산 다중 안테나 통신 기법은 셀룰러 시스템에서 지역적으로 분리된 클러스터들을 서비스하기 때문에 주파수 재사용을 가능하게 하며, 이로 인해 클러스터의 숫자에 비례하는 전체 셀룰러 용량 증대에 기여한다.

Key Words : Distributed Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), quantize-map-and-forward (QMF), compress-and-forward (CF), spatial reuse, user relaying

ABSTRACT

Exploiting multiple antennas at mobile devices is difficult due to limited size and power. In this paper, a distributed MIMO protocol achieving the capacity of conventional MIMO systems is proposed and analyzed. For exploiting distributed MIMO features, Quantize-Map-and-Forward (QMF) scheme shows improved performance than Amplify-and-Forward (AF) scheme. Also, the protocol based on multiple access channel (MAC) is proposed to improve the multiplexing gain. We showed that sufficient condition of the number of slave nodes to achieve the gain of a MAC based protocol. Because the base station can support multiple clusters operating in distributed MIMO, the total cellular capacity can be extremely enhanced in proportional to the number of clusters.

I. 서 론

최근 이동 통신 시장의 급격한 변화와 무선 통신 서비스의 발전에 따라 기존의 무선 통신 시스템보다

월등히 높은 데이터 전송에 대한 요구가 급격히 증가하고 있다. 미국의 네트워크 통신회사인 시스코 시스템의 보고서^[1]에 따르면 이동 통신의 월간 트래픽은 2014년 SNS의 사용증가, 실시간 비디오 스트리밍 등

* First Author : Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), bi_hong@kaist.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), wchoi@kaist.edu, 중신회원

논문번호 : KICS2014-05-188, Received May 20, 2014; Revised June 30, 2014; Accepted June 30, 2014

으로 인하여 현재 약 1.5엑사바이트(EB)에 이르며 향후 2018년 까지 10배 이상 증가하여 15.9EB에 이를 것이라고 추정되고 있다. 이러한 엄청난 통신 트래픽의 증가와 맞물려 학계와 산업계 전반에서는 주파수 대역이나 전력 등의 통신 자원을 추가로 사용하지 않고 전송 용량을 증대시키는 기법들에 대한 관심과 연구가 집중되고 있다. 이중 다중 안테나 기술 (MIMO, Multiple Input Multiple Output)^[2,3]은 4세대 무선 통신 기술에서 큰 비중을 차지하였을 뿐만 아니라 향후의 차세대 통신 시스템에서도 중요한 역할을 수행할 것으로 여겨진다. 다중 안테나 기술은 무선 통신 환경에서 송신기와 수신기가 각각 단일 안테나를 사용하던 기존 방식과 다르게 다중 안테나를 설치함으로써 빔을 형성하여 공간 다중화 이득을 얻어 제한된 주파수 대역에서도 통신 용량을 선형적으로 증가시키는 것을 가능하게 하였다.

그러나 차세대 이동 단말기에서의 전력 및 크기 등의 제약 조건으로 인해 다중 안테나 기술 적용이 제한된다. 다중안테나 통신을 위해서는 많은 전력이 필요할 뿐만 아니라 일정 정도의 공간적 분리가 되어 있는 안테나들이 필요한데^[2], 이것을 구현하는 것은 현재의 기술로서는 매우 어려운 것으로 여겨진다. 이를 해결하기 위한 방안으로 분산 네트워크에서 송수신기가 단일 안테나를 가지고 있으면서도 다수의 통신 노드들이 협력을 통해 분산된 형태의 수신 단을 구성하게 되면, 다중 안테나 기술에 의한 용량 증대와 유사한 효과를 얻는 분산 다중 안테나 통신에 대한 연구가 진행되어 왔다.

애드혹 네트워크에서 노드의 수에 비례하는 용량을 달성할 수 있는 것으로 알려진 계층적 협력 (Hierarchical Cooperation)^[4]기법에서도 분산 다중 안테나 통신 기술이 근간이 된다. 이러한 중요성에 근거하여, 분산 다중 안테나 시스템 구현을 위한 관련 알고리즘 및 구조에 관한 연구^[5,6]가 활발하게 진행되어 왔다.

본 논문에서 제안하고 다루는 분산 다중 안테나 통신은 셀룰러 환경에서 통신 신호를 받고자 하는 주 노드 (master node)가 기지국으로부터 뿐만 아니라 통신을 돕기 위해 주위에 분산되어 있는 부 노드 (slave node)들로부터 정보를 추가적으로 전달 받음으로써 분산 수신기 형태를 구축하고 기존의 다중 안테나 기법의 용량 증대 효과를 모방한다. 주 노드와 부 노드 간의 역할은 시간이 지남에 따라 변할 수 있다. 본 논문에서는 하향 링크에서 증폭 후 전달 (AF, Amplify-and-forward) 및 양자화 후 전달 (QMF,

Quantize-map-and-forward)방식을 기반으로 한 협력 다중 안테나 통신 기법을 사용하여 데이터 전송 속도를 높이는 방법을 연구하고, 모의 실험을 통해 성능을 분석하고, 적용된 분산 다중 안테나 기술의 이득을 보여준다. 또한 네트워크 용량 증대의 스케일링의 향상을 위해서, 분산 다중 안테나 통신을 위한 동작 절차인 부 노드들에서 주 노드로 정보를 전달 과정에 다중 접속 채널(MAC, Multiple Access Channel)을 구성할 수 있도록 하여 용량 스케일링의 향상을 달성하는 방법을 제시하고, 이를 위한 노드 선택 조건을 분석한다.

셀룰러 네트워크의 사용자들의 군집이 지역적으로 분리되어 있는 경우, 군집 사용자들을 묶어 여러 개의 사용자 클러스터를 형성할 수 있고, 지역적 주파수 재사용 (spatial reuse)을 기반으로 논문에서 제시된 분산 다중 안테나 통신을 여러 개의 클러스터에 순차적으로 적용할 수 있다. 이 경우, 순차적으로 처리되는 클러스터의 개수가 기지국 안테나 수를 넘지 않는 이상, 주파수 재사용률이 선형적으로 향상되고 셀룰러 네트워크에서 높은 전송 용량을 확보할 수 있게 된다.

II. 분산 다중 안테나 통신 시스템

본 논문에서 고려하는 분산 안테나 통신 시스템은 그림 1에서 볼 수 있듯이 전체 N 개의 다중 안테나가 장착되어 있는 기지국에서 단일 안테나를 장착하고 있는 다수의 노드들의 집합인 클러스터로 신호를 보내는 구조로 이루어진다. 그림 1과 같이 3개의 클러스터가 있는 경우에는 기지국이 각 클러스터를 순차적으로 서비스하게 되며, 하나의 클러스터가 기지국에 의해 서비스되는 동안 각 클러스터 내부에서는 분산 다중 안테나 통신 시스템 구성을 위한 부 노드들에서 주 노드로 정보 전달이 이루어진다. 각 클러스터들은 지역적으로 충분히 분리되어 있으므로 서로 간의 간

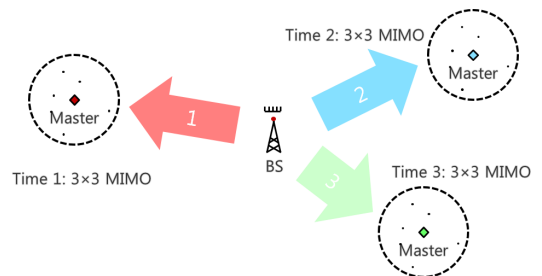


그림 1. 셀룰러 분산 다중 안테나 모델.
Fig. 1. Distributed MIMO model in Cellular Networks.

쉽어 없게 되어 지역적 주파수 재사용이 가능하다. 하나의 클러스터는 기지국으로 부터의 신호를 전달받는 것을 목적으로 하는 하나의 주 노드와 주 노드를 돕기 위한 $N-1$ 개의 부 노드들로 이루어진다. 클러스터 안의 부 노드들은 $1, \dots, N-1$ 로 나타내고, 주 노드는 N 으로 나타낸다. 이 경우의, 다음의 행렬이 기지국의 다중 안테나로 부터 부 노드들 및 주 노드로의 채널을 나타내게 된다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1} & \dots & h_{N,N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 h_i 는 기지국으로부터 i 번째 노드로의 채널을 나타내게 된다. 또한 각 부 노드 i 로부터 주 노드의 채널은 g_i 로 나타내게 되며, 기지국으로부터 각 노드로의 거리는 $d_{S,i}$ 로, 부 노드 i 로부터 주 노드까지의 거리는 $d_{i,D}$ 로 나타낸다.

위와 같은 모델에서 부 노드들이 다양한 신호 전달 기법을 실행했을 때 얻게 되는 전송 용량의 증대를 기존의 다중 안테나 기법과 비교 분석한다. 본 논문이 다루고 있는 분산 다중 안테나 통신 모델에서는 첫 번째 단위 전송시간 동안에 기지국으로부터 주 노드와 부 노드들을 포함한 모든 노드가 기지국의 전송신호를 받게 되고 나머지 $N-1$ 개의 부 노드가 각 단위 시간동안 기지국으로부터 수신한 신호를 주 노드로 전달하는 방식으로 동작을 하게 된다. 기본적으로는 부 노드들이 기지국으로부터 수신한 신호를 그대로 혹은 약간의 변형을 가해서 차례대로 전송하게 된다. 그림 2와 같이 3개의 안테나가 기지국에 장착되어 있고, 부 노드가 총 2개가 있는 경우, 처음 단위 시간동안에는 기지국이 전송을 하게 되고 이후 2, 3번째 단위 시간 동안 부 노드 1과 부 노드 2가 각각 받은 신호를 주 노드로 전송한다.

부 노드에서 주 노드로 수신 신호를 전달할 때 여

러 가지 신호 중계 방식이 사용될 수 있지만, 본 논문에서는 전통적인 중계 네트워크에서 사용되는 증폭 후 전달 기법과 양자화 후 전달 기법 두 가지 방식을 고려한다. 복호 후 전달 (DF, Decode-and-Forward) 기법의 경우는 채널의 조건에 따라 전송을 못하게 되는 경우가 발생하게 되는데, 본 논문에서 고려하는 분산 다중안테나 통신 모델은 확률적인 채널 모델인 가우시안 채널 (Gaussian channel)을 가정하고 있기 때문에, 본 논문에서는 배제한다.

III. 양자화 후 전달 기법에 관한 간단한 소개

양자화 후 전달 기법의 경우는 기존의 압축 후 전달 기법 (CF, Compress-and-Forward)의 실제적인 구현 방식으로 제안되었으며^[7], 모든 채널의 정보를 알아야 하는 압축 후 전달 기법과 달리 제한된 채널 정보만을 가지고도 최적 채널 용량을 달성하는 압축 후 전달 기법과 근접한 성능을 내는 것^[8]으로 밝혀졌을 뿐만 아니라, 다이버시티-다중화-트레이드오프 (diversity-multiplexing-tradeoff, DMT) 관점에서는 압축 후 전달 기법과 동일한 성능을 내는 것으로 알려져 있다.

양자화 후 전달 기법에서는, 수신한 아날로그 신호를 일정한 정도의 양자화 오류를 갖는 수준 (quantization distortion)으로 양자화 한다. 양자화 된 신호를 코드 복을 기반으로 신호 전송을 위한 코드워드로 대응하여 송신을 하게 된다. 이러한 방식의 신호 전달은 증폭 후 전달과 복호 후 전달 두 가지 방식의 특이점을 모두 가지고 있다. 복호 후 전달 방식의 가장 큰 단점이었던 수신 신호 복호화 및 중계과정에서 오류가 확산되는 현상 (error propagation)을 피할 수 있고, 증폭 후 전달 방식에서의 잡음 증폭 (noise enhancement) 현상 또한 억제된다. 따라서 양자화의 성감 정도를 적당히 잘 구현하게 되면 증폭 후 전달 방식과 복호 후 전달 방식의 장점을 모두 누리며, 압축 후 전달 방식에 의한 최적 용량에 근접하는 성능을 달성할 수 있다. 이러한 양자화 후 전달방식에 의한

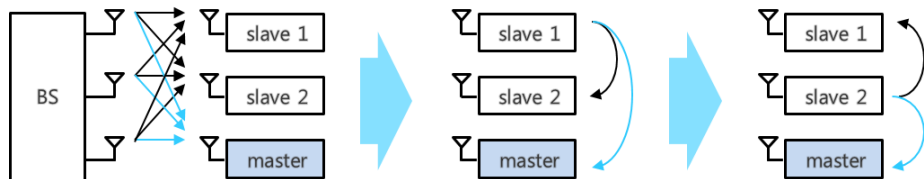


그림 2. 기본적인 분산 다중 안테나 시스템의 동작.
Fig. 2. Basic Operation of Distributed MIMO system.

신호 중계는 격자 코드 (lattice code)를 통해서 구현 될 수 있으며, 여러 개의 다중 중계 노드가 존재할 경우^[9]에서도 격자 코드를 통해서 구현 가능성이 밝혀져 있다.

그림 3과 같은 간단한 중계채널에서 양자화 후 전달 방식의 신호 중계를 수행하는 경우 채널 용량은 다음과 같이 주어 질 수 있다.

$$R_{QMF} = \min \left\{ \begin{aligned} & I(X, X_r; Y) - I(Y_r; \hat{Y} | X, X_r, Y), \\ & I(X; \hat{Y}_r, Y | X_r) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

여기서 \hat{Y}_r 는 양자화된 신호를 나타낸다. 식 (2)에 따르면 양자화 후 전달 기법은 양자화 과정에서 원본 정보 대비 정확성 손실 등의 이유로 인해 일정 양의 용량 손해가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 다중 사용자의 경우 또한 비슷하게 수식을 사용하여 표현할 수 있고, 양자화 과정에서 발생하는 손해를 가우시안 채널환경에서 정량화하여 신호 중계 채널의 채널 용량을 제시하고, 이를 기반으로 하는 분산 다중 안테나 통신 시스템의 성능을 도출한다.

IV. 분산 다중안테나 시스템의 채널 용량

본 절에서는 분산 다중 안테나 시스템에서의 채널 용량을 제시하여, 기존의 단순 다중 안테나-단일안테나 (MISO) 송수신 기법의 성능과 비교한다. 분산 다중 안테나 통신 구축을 위해서는 증폭 후 전달 기법과 양자화 후 전달 기법을 통한 부 노드들에서 주 노드로 신호 전달을 고려한다.

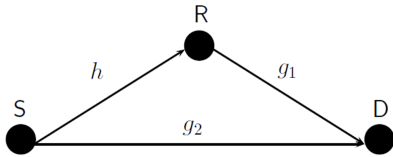


그림 3. 간단한 릴레이 채널.
Fig. 3. Simple 3 user relay channel.

4.1 MISO기법을 활용했을 경우의 시스템의 전송 용량

부 노드들을 활용하지 않고, 기지국과 주 노드간의 직접 신호 송수신에 기반 하는 MISO기법의 성능을 제시한다. MISO기법의 경우, 기지국 다중 안테나를 통해 얻어지는 송신 다이버시티 이득만을 갖게 된다. 이 경우 기지국과 주 노드간의 전송 용량은 다음과 같

이 주어진다.

$$E[\log_2(1 + d_{S,D}^{-\alpha} |h_{N}^T|^2 \text{SNR})]. \quad (3)$$

위의 식에서 α 의 경우는 신호 감쇄 (pathloss) 상수를 나타낸다. 위의 식과 같은 MISO 전송의 경우, 다중화 이득은 1, 다이버시티 이득은 기지국의 송신 안테나 개수인 N 이 된다.

4.2 증폭 후 전달 기법 (AF)방식을 활용했을 경우의 분산 다중 안테나 시스템의 전송 용량

증폭 후 전달 기법을 도입했을 경우, 분산 다중안테나 시스템의 전송 용량을 유도한다. 증폭 후 전달 기법을 사용하는 경우, 각 부 노드들은 수신 아날로그 신호를 각 부 노드들의 전송 전력량 한계를 넘지 않는 범위에서 증폭하여 주 노드에 전달한다.

각 부 노드에서 증폭 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_i = \sqrt{\frac{P}{\left| \sum_{j=1}^N d^{-\alpha_{s,i}/2} h_{ij} \right|^2 + N_0}} \quad (4)$$

따라서 부 노드들을 통해 주 노드가 수신한 전체 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}_e \mathbf{x}(t) + \mathbf{z}_e(t) \quad (5)$$

위에서 채널 행렬은 다음과 같고,

$$\mathbf{H}_e = \text{diag}(|d_{1,D}|^{-\alpha/2} g_1 \beta_1, \dots, |d_{N-1,D}|^{-\alpha/2} g_{N-1} \beta_{N-1}, 1) \mathbf{H} \quad (6)$$

기지국과 주 노드사이의 전체 채널 용량은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$C_{AF} = \frac{1}{N} E[\log_2 |I_N + \mathbf{H}_e R^{-1} \mathbf{H}_e^\dagger \text{SNR}|] \quad (7)$$

위의 식에서 R 은 정규화 된 잡음 벡터 \mathbf{z}_e/N_0 의 공분산 (covariance) 행렬이 된다. 이 경우, 기존의 MISO결과와 비교했을 때, 전송용량이 증가하는 만큼 전송시간을 사용하기 때문에 클러스터 내에서 다중화 이득은 없지만, 최대 다이버시티 이득은 부 노드들의

도움을 받아 N^2 까지 늘어난다. SNR 변화에 따른 채널 용량을 그래프로 나타내었을 경우, 높은 SNR에서의 기울기는 일정하여 다중화 이득이 없는 것을 확인할 있지만, 다이버시티 이득을 통해 실제 시스템 동작에서 고려되는 SNR 범위 내에서의 전송용량 향상을 기대할 수 있다. 또한 여러 클러스터가 존재하는 셀룰러 환경에서는 각 클러스터가 지역적으로 분리되어 순차적으로 분산 처리되므로 주파수 재사용의 이점을 누릴 수 있다.

4.3 양자화 후 전달 (QMF)방식을 활용할 경우
다중 안테나 시스템의 전송 용량

양자화 후 전달 방식을 적용할 경우, 본 논문에서 제안하는 분산 다중 안테나 시스템의 달성할 수 있는 최대 용량 (achievable rate) 은 커트세트 한계 (cut-set bound)를 통해서 다음과 같이 주어지게 된다.

$$\begin{aligned}
 & C_{QMF} \\
 &= \frac{1}{N} E \left[\min_{\Omega \subseteq \{1, \dots, N-1\}} \right. \\
 & \left. \log_2 \left(\frac{|I_{\Omega+1} + \mathbf{H}([\Omega, N]) \mathbf{H}^T([\Omega, N]) \text{SNR}|}{\prod_{i \in \Omega} \Delta_i} \right) \right] \quad (8) \\
 &+ \sum_{j \in \Omega} \log_2 (1 + \text{SNR} |g_j|^2 |d_{j,D}|^{-\alpha}) \\
 &- \sum_{j \in \Omega} \log_2 (1 + 1/\Delta_j)
 \end{aligned}$$

위 식에는 양자화로 인한 정보의 손실 등이 반영되어 있으며, 형성된 여러 커트 세트들에 의해 계산된 용량들 중 가장 낮은 용량이 전체 용량으로 결정된다. 위의 식에서 Ω 는 커트세트를 정하는 용도로 쓰여지며 Δ_i 는 부 노드 i 에서의 양자화 왜곡 정도 (quantization distortion level)을 나타낸다. 채널의 상태에 따라서 양자화 왜곡 정도를 잘 조절할 수 있다면 더욱 더 높은 성능을 낼 수 있다. 예를 들어, 기지국에서 부 노드로의 채널이 좋은 경우는 양자화 왜곡 정도를 작게 양자화 하여 충분히 원본과 같은 신호를 전송하여 전체 채널 용량을 높일 수 있으며, 반대로 채널 상황이 좋지 않은 경우는 오히려 왜곡 정도를 높여 양자화를 수행하여 채널환경에 강인하게 낮은 전송용량으로 보내는 것이 유리할 수 있다. 양자화 후 전달 방식을 사용하는 분산 다중 안테나 시스템에서도, 증폭 후 전달 방식을 사용하는 분산 다중 안테나 시스템과 유사하게 부 노드들이 주 노드로 신호를 중계 전달하기 위해 소요되는 시간으로 인한 전체 용량이 $1/N$

의 비율로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 증폭 후 전달 기반의 분산 다중 안테나 시스템과 마찬가지로 여러 클러스터가 존재하는 셀룰러 환경에서는 각 클러스터가 지역적으로 분리되어 순차적으로 분산 처리되므로 주파수 재사용의 이점을 누릴 수 있다.

V. 다중 사용자 접속 채널 구성을 통한 분산
다중안테나 기법

5.1 기법의 소개

앞서 설명된 증폭 후 전달 기반 및 양자화 후 전달 기반 분산 다중 안테나 통신은 부 노드들이 수신한 신호를 주 노드에 전달하는 과정을 통해 가상의 MIMO 채널을 형성하고, 이에 따라 기지국의 안테나의 개수 N 만큼의 다중화 이득을 얻을 수 있다. 그러나 부 노드들에서 주 노드들로 신호 중계 전달에 필요한 시간이 소요되기 때문에, 가상 MIMO 채널을 형성하여 통신하기 까지 N 만큼의 단위 시간이 소요된다. 따라서 실질적인 다중화 이득이 상실되는 문제가 발생한다. 따라서 클러스터의 주파수 재사용에 의한 이득을 배제하는 경우, 분산 다중 안테나 시스템을 통해 다중화 이득을 얻기 위해서는 부 노드들이 수신한 신호를 주 노드로 전달하는데 소요되는 시간을 줄이는 것이 관건이 된다. $N-1$ 개의 부 노드들은 시분할에 의해 총 $N-1$ 시간을 소요하여 순차적으로 수신 신호를 중계 전달하는 대신, 여러 개의 부 노드들이 수신 신호 중계 전달을 할 때 다중 사용자 접속 채널 (MAC: Multiple Access Channel)을 형성하여 전송하게 되면 시분할에 의해 여러 번에 이루어질 전송 시간을 줄일 수 있다. 단, 다중 사용자 접속 채널을 통해 각 부 노드에서 주 노드로 중계 전달되는 정보량이 기존의 시분할 전송에 의해 주 노드로 중계 전달되는 정보량보다 작아서는 안 된다.

다중 사용자 접속 채널을 형성하여 부 노드들의 수신 신호를 주 노드로 중계 전달하는 경우, 기존의 증폭 후 전달 방식은 사용될 수 없다. 여러 개의 부 노드들이 동시에 증폭 후 전달 방식으로 전송하게 되면 증폭된 아날로그 신호들이 합쳐져서 주 노드에서 수신되기 때문에 각 부 노드로부터 전송된 신호의 복호가 불가능하다. 반면, 양자화 후 전달 방식의 경우 부 노드들이 서로 다른 코드북 (codebook)을 사용하여, 아날로그 신호를 전송 코드워드로 대응 시켜서 전송하므로, 적절한 다중 사용자 접속 채널이 형성된다면 주 노드에서 각 부 노드로부터의 신호를 복호하여 가

상 MIMO 채널을 형성할 수 있다.

다중 사용자 접속 채널을 형성하여 분산 다중 안테나 통신 시스템을 구성하는 경우, 다음과 같은 방식으로 동작한다.

- 1) 첫 번째 단위 시간 동안, 기지국이 주 노드와 부 노드들로 MIMO 송신 기법을 통해 신호를 전송한다.
- 2) $N-1$ 개의 부 노드들이 주 노드를 위해 수신 신호를 중계 전달하기 위해 다중 사용자 접속 채널을 구성한다. 이 때 $N-1$ 개의 부 노드들이 동시에 다중 사용자 접속 채널을 구성하지 못하고, 일부 부 노드들 (m 개의 부 노드들이라고 가정)이 다중사용자 접속 채널을 구성하고 나머지는 시분할에 의해 중계 전달한다면, 모든 부 노드들이 시분할 전송에 기반을 두어 중계 전달에 소요되는 시간인 $N-1$ 보다 작은 $N-m$ 시간만을 사용하게 된다.

예를 들어, 기지국이 3개의 안테나를 장착하고 있고, 부 노드 2개가 주 노드에 도움을 주는 경우를 살펴보면, 다중 사용자 접속 채널을 형성하지 않는 경우, 그림 4와 같이 부 노드들은 시분할에 의해 순차적으로 수신 신호를 주 노드로 중계 전달한다. 그러나 2개의 부 노드가 그림 5와 같이 다중 사용자 접속 채널을 구성하여 수신 신호를 주 노드로 중계 전달한다면 중계 전달에 걸리는 시간을 줄일 수 있다. 그림 4와 비교하면, 분산 다중 안테나 통신을 위한 전송 시간이 총 3개의 단위 시간에서 2개의 단위시간으로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 다중화 이득이 개선되고 용량을 1.5배 가량 향상시킬 수 있게 된다. 앞서 언급한 바와 같이 다중 사용자 접속 채널을 활용하기 위해서는 다중 사용자 접속 채널을 통해 각 부 노드에서 주 노드로 중계 전달되는 정보량이 기존의 시분할 전송에 의해 주 노드로 중계 전달되는 정보량보다 작아서는 안 되기 때문에, 이를 보장할 수 있는 환경에서만 활용될 수 있다.

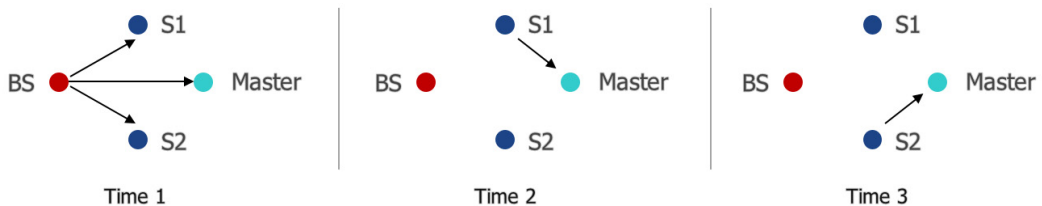


그림 4. 기지국이 3개의 안테나를 가지고 있을 때 분산 다중 안테나의 동작
Fig. 4. Operation of distributed MIMO system with 3 antennas at the base station

5.2 다중 사용자 접속 채널의 구성을 위한 최소 사용자 숫자 스케일링

본 절에서는 여러 노드들 중 일부 노드를 선택하여 부 노드 역할을 부여함으로써 다중 사용자 접속 채널을 구성할 수 있는 조건을 충족시키는 방법을 살펴본다. 단순화를 위해, 본 논문에서는 2개의 부 노드를 사용하는 경우에 한정한다. 임의의 부 노드 수에 대한 일반화된 확장은 본 절에서 제시되는 결과를 확장함으로써 일반화 시킬 수 있다. 양자화 후 전달 방식에 기반 하는 분산 다중 안테나 시스템의 경우, 다중 사용자 접속 채널을 구성하여 부 노드들에서 주 노드로의 신호 중계 전달 소요 시간을 줄이는 경우, 2개의 커트셋트 한계 중에 다중 사용자 접속채널의 병목현상이 발생하는 경우의 전송 용량은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{QMF}^{MAC} = \frac{1}{3} E[\log(1 + |h_{33}|^2 \text{SNR}) + \log\left(1 + \frac{|g_1|^2}{1/\text{SNR} + |g_2|^2}\right) - \log\left(1 + \frac{1}{\Delta_1}\right) + \log(1 + |g_2|^2 \text{SNR}) - \log\left(1 + \frac{1}{\Delta_2}\right)] \quad (9)$$

여기에서 주목할 점은 중첩된 신호 (superposed signal)를 상대적으로 강한 채널을 가지고 있는 부 노드 신호부터 약한 채널을 가지고 있는 부 노드 신호 순서로 주 노드에서 복호를 수행하게 되므로, 첫 번째 복호하는 부 노드의 신호에 두 번째 복호할 부 노드의 신호가 간섭으로 작용하게 된다. 이에 따라 전체 용량의 스케일링 향상이 제한되므로, 이러한 상호 간섭에 의한 영향을 상쇄할 수 있을 정도의 채널의 구성이 요구된다. 부 노드로 활용될 수 있는 후보 노드들의 수가 많아지는 경우, 다중 사용자 접속 채널 구성의 여러 조합을 고려하여, 상호 간섭의 영향이 없도록 하는 조합이 될 수 있는 부 노드들을 선택한다. 위의 경우

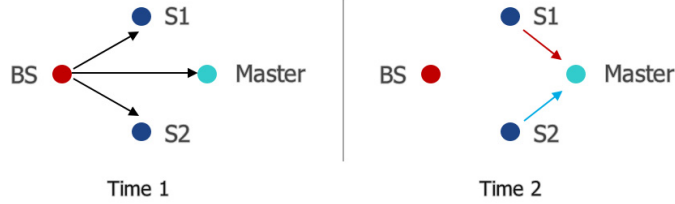


그림 5. 2개의 부 노드들의 다중 접속 채널의 형성
Fig. 5. Multiple access channel by 2 slave nodes

$|g_2|^2$ 가 간섭으로 작용하는 신호의 세기이기 때문에, 다음과 같은 조건을 만족 시킨다면 용량 스케일링 (DoF: Degrees of freedom)의 향상을 기대할 수 있다.

$$\Pr \left[|g_2|^2 \leq \frac{1}{\text{SNR}} \right] = 1 - \exp \left[-K \cdot \frac{1}{\text{SNR}} \right] = P_u \quad (10)$$

위의 식에서 P_u 는 일정한 상수를 의미하며 K 는 부 노드로 사용될 수 있는 후보 노드들의 숫자이다. 위의 식은 순서 통계 (order statistic)에서의 가장 작은 확률 변수의 분포를 통해 얻어 질 수 있다. 위의 식을 필요한 후보 노드 수에 대해서 풀게 되면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$K = \text{SNR} \cdot \log \left(\frac{1}{1 - P_u} \right) \approx O(\text{SNR}) \quad (11)$$

따라서 부 노드로 활용될 수 있는 후보 노드의 수가 SNR에 비례하게 증가한다면 두개의 부 노드가 다중 사용자 접속 채널 구성을 통해 주 노드로 수신 신호 중계 전달이 가능하고, 분산 다중 안테나 시스템의 다중화 이득 향상을 기대할 수 있다.

VI. 실험 결과

본 장에서는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 기지국과 주 노드 및 부 노드들을 모델링하고 이에 따른 실제적인 용량을 실험하였다. 기존 방식과 증폭 후 전달 및 양자화 후 전달 방식을 사용한 분산 다중 안테나 시스템의 성능을 시뮬레이션 하였으며, 실제 대부분의 SNR 영역에서 성능의 향상을 확인할 수 있었다. 본 결과는 부 노드 활용을 통한 분산 다중 안테나 시스템의 활용의 실제적인 타당성을 부여한다. 또한 셀룰러 네트워크에서 클러스터 간의 간섭이 존재하지 않는 경우, 클러스터들의 순차적 분산적인 처리가 가능하므로 주파수 재사용에 따른 추가적 이득을 얻을

수 있다.

6.1 3개의 부 노드들을 이용할 경우의 성능 실험 전체 부 노드의 개수를 3개로 한정하고 각 기법에 대한 성능의 비교를 하였다. 대상 방식은 기존 방식인 직접 MISO 송수신과 증폭 후 전달 방식 및 양자화 후 전달방식 기반 분산 다중 안테나 시스템을 비교하였다. 또한 주 노드로의 신호 중계 전달에 다중 사용자 접속 방식을 도입한 방식 또한 실험 하였다. 모든 실험 자료의 가로축은 송신 전력인 SNR, 세로축은 전송 용량이다. 채널간의 상관성이 있는 경우에는 널리 알려진 송수신단의 상관성을 나타내는 Kronecker 모델이 도입되었다. Kronecker 모델은 다음과 같은 구성을 갖는다.

$$H = R_{RX}^{1/2} G (R_{TX}^{1/2})^T$$

where $R_{RX} = E[H^T H^*]$, $R_{TX} = E[HH^H]$ (12)

그림 6에서는 기지국과 주 노드 사이에 부 노드가 위치한다는 가정 하에 제안된 양자화 후 전달 기반의 분산 다중 안테나 기법과 다른 기법의 성능을 실험한 결과를 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있듯 양자화 후

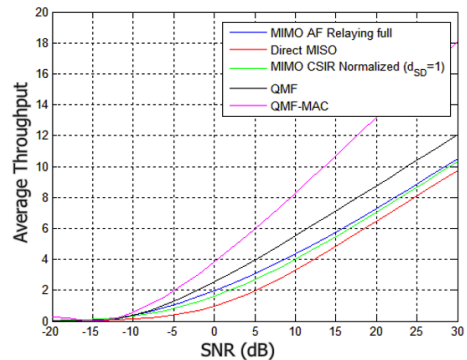


그림 6. 채널 상관성이 없는 경우의 제안된 기법과 타기법의 전송용량 비교 실험 결과
Fig. 6. Average throughput simulation without channel correlation

전달 기반의 분산 다중안테나 기법의 성능이 다중 접속 채널을 형성하였을 때는 MISO, 증폭 후 전달 기반의 분산 다중 안테나 기법 보다 우수한 성능을 보여줌을 알 수 있다.

또한 그림 7에서와 같이 각 노드의 채널간의 상관도 (correlation)가 극심한 경우의 성능 또한 실험하였는데 이미 다중안테나 통신에서 다중화 이득이 채널 상관도로 인해 손실되는 것이 알려져 있다. 위의 실험에서도 마찬가지로 MISO기법을 제외한 증폭 후 전달 및 양자화 후 전달 기반의 분산 다중 안테나 기법이 채널 상관도로 인한 성능 저하가 확인되지만 다중사용자 접속 채널을 구성하여 부 노드 수신 신호를 주 노드에 전달할 경우, 채널간의 상관이 있을 경우에도 기존의 기법에 비해 우수한 성능을 달성할 수 있음이 확인된다.

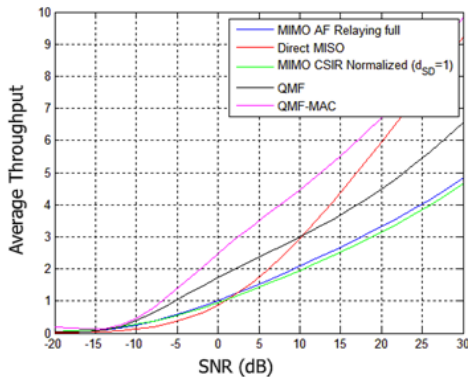


그림 7. 채널 상관이 송수신단 모두 $\rho = 0.99$ 인 경우 제안된 기법과 타기법의 전송용량 비교 실험 결과
 Fig. 7. Average throughput simulation with transmit and receive correlation is $\rho = 0.99$

VII. 결 론

본 연구에서는 셀룰러 네트워크에서 신호 중계 전달 기반 분산 다중 안테나 시스템의 성능을 분석하였다. 증폭 후 전달 방식과 양자화 후 전달 방식을 활용하여 부 노드들의 수신 신호를 주 노드에 전달하여 가상 다중 안테나 시스템을 구성하는 방법을 제안하고 기존 방식과 성능 비교를 수행하였다. 또한 다중화 이득 향상을 위해, 부 노드들의 수신 신호를 주 노드에 전달하는 과정에서 부 노드들로 다중 사용자 접속 채널을 구성하는 방법을 제안하고, 부 노드 선택을 통해 이를 가능하게 하는 조건을 제시하였다.

Acknowledgement

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0029329).

References

- [1] Cisco, Visual Networking Index: *Global Mobile Data Forecast Update 2013-2018*. Feb. 5, 2014.
- [2] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," *AT&T Bell Labs. Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41-59, 1996.
- [3] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *Europ. Trans. Telecommun.*, vol. 10, no. 6, pp. 585-596, Nov. 1999.
- [4] C.-N. Chuah, D. N. C. Tse, J. M. Kahn, and R. A. Valenzuela "Capacity scaling in MIMO wireless systems under correlated fading," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 48, no. 3, pp. 637-650, 2002.
- [5] H. Shin and J. H. Lee "Capacity of multiple-antenna fading channels: Spatial fading correlation, double scattering, and keyhole," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2636-2647, 2003.
- [6] A. Ozgur, O. Leveque, and D. N. C. Tse, "Hierarchical cooperation achieves optimal capacity scaling in ad hoc networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3549-3572, Oct. 2007.
- [7] F. Quitin, M. M. U. Rahman, R. Mudumbai, and U. Madhow, "A scalable architecture for distributed transmit beamforming with commodity radios: Design and proof of concept," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 3, pp. 1418-1428, Mar. 2013.
- [8] R. Mudumbai, D. R. Brown III, U. Madhow, and H. V. Poor, "Distributed Transmit Beamforming: Challenges and Recent Progress," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no.

2, pp. 102-110, Feb. 2009.

- [9] S. Pawar, A. S. Avestimehr, and D. N. C. Tse, "Diversity-multiplexing tradeoff of the half-duplex relay channel," in *Proc. Allerton Conf. Commun., Control Comput.*, Monticello, IL, Sept. 2008.
- [10] A. S. Avestimehr, S. N. Diggavi and D. Tse, "Wireless network information flow: A deterministic approach," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 4, pp. 1872-1905, Apr. 2011.
- [11] A. Ozgur and S N. Diggavi, "Approximately achieving Gaussian relay network capacity with lattice codes," in *Proc. IEEE ISIT*, pp. 669-673, Austin, Texas, Jun. 2010.

홍 비 (Bi Hong)



2010년 2월 : 한국과학기술원 정보통신공학과 학사
 2012년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 석사
 2012년 2월~현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정

<관심분야> 다중 릴레이 협력 통신, 지리적 확률 모델 분석, 분산 저장장치

최 완 (Wan Choi)



1996년 : 서울대학교 전기 및 컴퓨터 공학부 학사
 1998년 : 서울대학교 전기 및 컴퓨터 공학부 석사
 2006년 : University of Texas at Austin, ECE 박사
 2011년~현재 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 부교수

2007년~2011년 : 한국과학기술원 조교수
 IEEE Transactions on Vehicular Technology Associate Editor
 IEEE Transactions on Wireless Communications Associate Editor
 IEEE Transactions on Wireless Communications Letter Associate Editor
 IEEE Journal on Selected Areas in Communications 5G Wireless Communication Systems Guest Editor
 <관심분야> 통신이론, 정보이론