

B4G 시스템을 위한 Massive MIMO 기술

I. 서론

최근 간단한 음성 통화와 문자 메시지 전송뿐만 아니라 웹브라우징 및 고화질 영상통화, 비디오 시청과 같은 서비스를 이용할 수 있는 스마트 폰과 스마트 가전제품들의 급속한 보급으로 인하여 1인당 데이터 트래픽 사용 요구량이 급증하고 있다^[1]. 이러한 요구를 맞추기 위하여 국내에서의 이동 통신 사업자들은 2011년부터 기지국당 최대 1Gbps 속도로 데이터 통신을 가능케 하는 4세대 이동 통신인 Long-Term Evolution (LTE) 서비스를 시작하였다. 하지만 HD급 고화질 동영상 시청에 대한 요구 및 사용자의 수의 급격한 증가로 예상되는 데이터 폭증에 대비하여 4세대 이후 이동 통신 시스템(B4G, beyond 4G) 또는 5세대 이동 통신 시스템(5G)에 대한 필요성 대두 및 연구가 진행되기 시작했다. B4G 이동 통신 시스템은 2020년경 상용화를 목표로 “언제 어디서나 제약 없이 개인별 Gbps의 고품질 미디어 서비스”를 제공하는데 초점을 맞춘다. 이를 위하여 이동 통신 시스템의 물리 계층은 4G 대비 1000배 이상의 데이터 용량을 제공하는 것을 목표로 한다^[2]. 1000배 이상의 용량 증대를 위한 세부적인 항목으로 1) 기존의 셀룰러 대역뿐만 아니라 고주파 대역을 이용하여 주파수 대역을 확보, 2) 소형 기지국을 비롯한 이기종 네트워크 배치를 이용하여 기지국 증가, 3) 다중 안테나를 이용하여 추가적인 공간 자유도를 확보하여 용량 증대이다. 또한 B4G 이동 통신 시스템은 높은 전송 속도 뿐만 아니라 최근 사회적으로 이슈인 저탄소 녹색성장에 맞는 저 전력 이동 통신 시스템 설계가 필요하다^[3]. 이동통신 시스템에서 사용하는 전체 전력 중 대략 60%는 기지국에서 사용되고^[4], 그 중 물리계층에서 줄일 수 있는 전력은 1)기지국에서 송신할 때 사용하는 무선 주파수 (RF: Radio



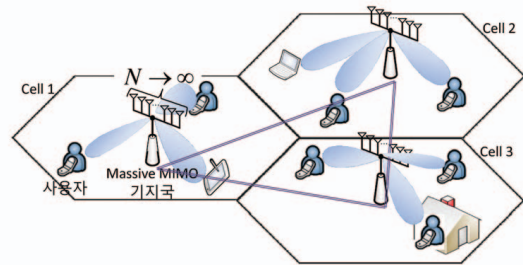
최 경 준
연세대학교



김 광 순
연세대학교

frequency) 송신 전력와 2) 기지국에서 송수신 신호를 처리하는 프로세싱에 들어가는 전력이다. 이러한 저전력 기지국은 이동통신망을 운영하는 사업자 관점에서 사업자의 운영비용 (OPEX: Operating expenditure)의 절감을 이끌어 낼 수 있다.

B4G 이동통신 시스템을 구성하는 다양한 핵심 기술 중 하나인 Massive MIMO 기술은 기지국에 수백 개 이상의 안테나를 장착하여 높은 전송 속도와 더불어 낮은 송신 전력 전송을 가능케 하므로 학계 및 산업체의 뜨거운 관심을 받고 있다^[5]. LTE 시스템에서 안테나 공간 자유도를 이용하여 최대 8개의 사용자에게 정보를 송수신할 수 있는 것에 대비하여 Massive MIMO 기술은 기지국에서 다수의 송수신 안테나를 이용하여 공간 자유도를 극대화하여 다수의 사용자에게 동시에 정보를 송신시키거나 빔형성 기술을 통하여 특정 사용자들에게 매우 높은 전송 용량을 제공할 수 있다. 또한 Massive MIMO 기술은 사용자의 서비스 품질 (QoS, Quality of service)를 만족시키기 위한 기지국의 송신 전력을 안테나 수에 비례하여 줄일 수 있으므로 저탄소 녹색 통신에 알맞다^[6]. 하지만 Massive MIMO의 장점들은 얻기 위해서 해결해야 하는 문제점들이 존재한다. 공간 자유도를 극대화 및 빔포밍 이득을 얻기 위해서는 각 사용자들과 기지국 안테나들 간의 채널을 완벽하게 추정하여야 한다. 하지만 실제 무선 채널 환경에서는 사용자의 이동성으로 인하여 채널의 상관 시간 및 상관 주파수가 한정되어 있으므로, 모든 사용자들의 채널을 완벽하게 추정할 수 없다. 여기서 사용자들의 신호 간의 간섭이 발생하는 파일럿 오염 (pilot contamination) 현상이 발생하여 성능 저하가 일어난다^[7]. 또한 채널 추정 오차는 서비스 품질을 만족시키기 위한 송신 전력의 증가를 야기한다. 사용자의 독립적인 신호를 수신하기 위해서는 복잡한 수신기가 필수적이다^[8]. 하지만 Massive MIMO는 기지국 안테나 수의 증가와 동시 전송 사용자 수가 증가하므로 수신기의 복잡도



〈그림 1〉 Massive MIMO 네트워크 구조 예제 (L=3, K=3)

가 매우 높아지게 된다. 그리고 다수의 안테나를 사용하여 송신하므로 평균 대비 최대 전력 (PAR: Peak to average power ratio)이 높아지므로 고비용의 증폭기를 사용하여야 하는 문제점을 해결하여야 한다^[9].

본 논문에서는 B4G 이동통신 시스템의 핵심 기술 중 하나인 Massive MIMO 기술에 대한 이론을 비롯하여 해결하여야 할 기술적 문제점들과 이를 해결하기 위한 최근 연구 동향에 대하여 소개한다.

II. Massive MIMO

1. Massive MIMO 네트워크 모델 및 가정

본 논문에서 고려할 Massive MIMO 네트워크는 〈그림 1〉에 나타나있는 것과 같이 L개의 기지국이 있고 각 기지국에서 N개의 안테나를 가지고 있고, K명의 단일 안테나를 가진 사용자와 동시에 송수신을 한다. 기지국과 사용자들 간의 무선채널환경은 T 슬롯 동안 일정하고 T 슬롯 후에 독립적으로 변하는 블록 페이딩 (block fading)을 따른다고 가정한다. 기존 LTE와 달리 Massive MIMO 네트워크의 가장 큰 차이점은 각 기지국의 안테나 수가 수백 개 이상으로 증가한다는 점이다. 따라서 안테나의 수가 동시에 송수신해야 되는 사용자수 보다 크다고 가정한다.

늘어난 기지국 안테나 수를 이용하여 사용자들과 송수신하기 위해서는 상·하향링크의 무선채널을 추정하여야 한다. 주파수 분할 듀플렉스 (FDD: Frequency

Massive MIMO 기술은 기지국에서 다수의 송수신 안테나를 이용하여 공간 자유도를 극대화하여 다수의 사용자에게 동시에 정보를 송신시키거나 빔형성 기술을 통하여 특정 사용자들에게 매우 높은 전송 용량을 제공할 수 있다.

division duplex) 방식은 상·하향링크의 주파수 대역이 다르므로 상·하향링크 무선채널을 독립적으로 추정하여야 한다. 여기서 하향링크의 무선채널을 추정하기 위

해서는 기지국의 안테나에서 서로 직교하는 파일럿을 송신하고 사용자가 이를 수신하여 채널을 추정하고 기지국으로 추정된 채널 정보를 피드백한다. 이러한 방식은 기지국의 안테나 수에 비례하여 직교하는 파일럿이 필요하게 되므로 Massive MIMO와 같이 기지국의 안테나가 수백 개 이상으로 늘어나는 시스템에 적합하지 않다. 시간 분할 듀플렉스 (TDD: Time division duplex) 방식은 상·하향링크가 동일한 주파수 대역을 사용하므로 상·하향링크의 무선채널이 동일하다. 여기서 무선채널 추정은 사용자 마다 서로 직교하는 파일럿을 상향링크로 송신하고 기지국에서 이를 수신하여 무선채널을 추정한다. 이러한 방식은 필요한 직교 파일럿의 수가 기지국의 안테나 수와는 관계없고 사용자의 수에 영향을 받는다. 따라서 Massive MIMO 시스템은 시분할 듀플렉스 방식을 사용하는 것이 보다 적합하다.

Massive MIMO 시스템은 시분할 듀플렉스 방식을 사용하는 것이 보다 적합

제공함과 동시에 동일한 자원을 이용하는 기지국으로부터 발생하는 간섭을 통계적으로 줄여주는 것을 특징으로 한다.

Massive MIMO의 원리는 다음의 랜덤 변수들의 특성을 이용한다^[12]. 두 $N \times 1$ 랜덤 벡터 $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_N]^T$ 와 $\mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$ 가 상호 독립이고 각각의 원소들은 평균이 0, 분산이 σ_u^2 과 σ_v^2 인 독립이고 동일한 분포를 따르면 큰 수의 법칙에 따라 다음을 만족한다.

$$\frac{1}{N} \mathbf{u}^H \mathbf{u} \xrightarrow{a.s.} \sigma_u^2, \text{ and } \frac{1}{N} \mathbf{u}^H \mathbf{v} \xrightarrow{a.s.} 0, \text{ as } N \rightarrow \infty \quad (1)$$

여기서 $\xrightarrow{a.s.}$ 는 almost sure 수렴을 의미한다. 무선 채널이 위와 같은 “favorable propagation (FP)” 특성을 가지고 있다^[5]. 즉, 기지국의 안테나 수를 N 이라 하고, 단일 안테나를 갖는 j 번째 사용자와 l 번째 기지국 간의 $N \times 1$ 무선채널 벡터 $\mathbf{h}_j^{[l]}$ 는 N 이 증가함에 따라 다음을 만족한다.

$$\frac{\mathbf{h}_j^{[l]} \mathbf{h}_i^{[m]H}}{N} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = j \text{ and } l = m, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

따라서 FP특성으로 인하여 다른 셀에서 발생하는 간섭은 점근적으로 사라진다. 이를 보이기 위해서 각 셀의 사용자가 한 명이라고 하고 사용자를 구분하는 아래 첨자는 생략한다. 상향링크에서 n 번째 기지국이 수신된 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{r}^{[l]} = \sum_{n=1}^L \sqrt{\beta^{[n]}} p^{[n]} \mathbf{h}^{[n]} s^{[n]} + \mathbf{n}^{[l]} \quad (3)$$

여기서 $s^{[n]}$ 은 n 번째 사용자의 송신 신호이고, $p^{[n]}$ 은 n 번째 사용자의 송신 파워, $\beta^{[n]}$ 은 n 번째 사용자와 기지국 간의 대규모 페이딩 값이고, $\mathbf{n}^{[l]}$ 은 평균이 0이고 공분산이 $N_0 \mathbf{I}$ 인 잡음성분이다. 수신단에서 선형필터 $\mathbf{f}^{[l]}$ 를 사용하면, 얻을 수 있는 신호 대 간섭 잡음비 (SINR: Signal to interference and noise power ratio)는 다음과 같다.

2. Massive MIMO의 간섭 억제 원리

이동 통신 시스템에서 성능 저하의 가장 큰 원인은 동일한 자원을 공유하는 인접 기지국으로부터 발생하는 간섭이다. 이를 해결하기 위해서는 LTE 시스템에서는 기지국 간 간섭을 줄이는 자원 분배 방식인 기지국 간 간섭 조정 (ICIC: Inter-cell interference coordination)기법 또는 기지국 간 간섭 채널 정보를 교환하거나 전송해야 되는 신호를 교환하여 협력하여 송신하는 기지국 협력 송신 (CoMP: Coordinated multipoint processing)기법을 이용한다^[10,11]. 하지만 이러한 기법은 줄일 수 있는 간섭의 양이 한정되어 있을 뿐만 아니라 협력을 위한 기지국 간의 신호 교환이 필수적이므로 높은 용량의 백홀 설치가 필수적이다. 이와는 달리 <그림 1>에 나타낸 Massive MIMO 네트워크는 기존의 이동 통신망과는 달리 다수의 안테나를 이용한 빔형성을 통하여 사용자들에게 높은 수신 전력을

$$SINR^{[l]} = \frac{\beta^{[l]} p^{[l]} \left| (\mathbf{f}^{[l]})^H \mathbf{h}^{[l]} \right|^2}{\sum_{n=1, n \neq l}^L \beta^{[n]} p^{[n]} \left| (\mathbf{f}^{[l]})^H \mathbf{h}^{[n]} \right|^2 + N_0 \|\mathbf{f}^{[l]}\|^2} \quad (4)$$

FP 특성을 이용하기 위하여 간단한 정합 필터를 사용하고, 즉, $\mathbf{f}^{[l]} = p^{[l]} \beta^{[l]} \mathbf{h}^{[l]} / N$ 를 사용하고, N 이 늘어나가 되면 FP에 의하여 간섭 부분과 잡음 부분은 0으로 수렴하게 되고 신호 부분은 $p^{[l]} \beta^{[l]}$ 으로 수렴하여 결과적으로 SINR은 다음과 같이 주어진다^[13].

$$SINR^{[l]} \xrightarrow{a.s.} \frac{p^{[l]} \beta^{[l]}}{N_0} O(N) \quad (5)$$

따라서 Massive MIMO는 기지국의 안테나 수를 증가시키면 얻을 수 있는 SINR이 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

3. Massive MIMO의 특징

MIMO 채널의 용량은 Shannon의 채널 용량 정리에 따라서 다음과 같다.

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_K + \frac{\mathbf{G}^H \mathbf{G}}{N_0} \right) \quad (6)$$

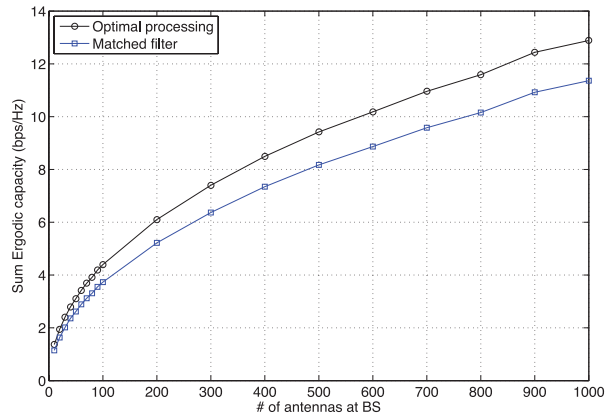
여기서 $\mathbf{G} = [\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_K]$ 는 $N \times K$ 행렬로 K 사용자들과 N 기지국 안테나들 간의 무선채널로 $\mathbf{g}_i = \sqrt{p_i} \beta_i \mathbf{h}_i$ 이다. 식 (2)의 FP로 인하여 기지국의 안테나 수 N 이 증가하면 용량은 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$C \xrightarrow{a.s.} \sum_{j=1}^K \log_2 \left(1 + N \frac{p_j \beta_j}{N_0} \right) \sim O(K \log_2 N) \quad (7)$$

위 식으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- Massive MIMO는 기지국의 안테나 수를 증가시키면 수신 신호 대 잡음비 (SNR: signal-to-noise ratio)는 비례하여 증가한다. 따라서 전체 전송 용량은 기지국의 안테나 수의 로그에 따라 증가한다.

Massive MIMO는 기지국의 안테나 수를 증가시키면 얻을 수 있는 SINR이 선형적으로 증가
Massive MIMO는 기지국의 안테나 수를 증가시키면 수신 신호 대 잡음비 (SNR: signal-to-noise ratio)는 비례하여 증가
Massive MIMO는 동시에 전송하는 사용자의 수를 늘려서 전체 전송 용량을 증가시킬 수 있다.



〈그림 2〉 Massive MIMO 채널 용량 (K=10, L=7)

- Massive MIMO는 동시에 전송하는 사용자의 수를 늘려서 전체 전송 용량을 증가시킬 수 있다. 만약 모든 사용자들의 수신 신호 대 잡음비가 동일하다고 가정하면, 전체 전송 용량은 동시에 전송하는 사용자들의 수에 선형적으로 비례하여 증가한다.

기지국에 설치된 다수의 안테나를 이용한 공간 자유도는 전체 전송 용량을 증가시키는데 사용할 수 있을 뿐만 아니라, 사용자가 요구하는 서비스 품질을 맞추면서 기지국 송신 전력을 줄일 수 있다. 식 (7)을 이용하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 기지국 안테나의 수를 증가시키면 그에 비례하여 수신 신호 대 잡음비가 선형적으로 증가하므로 일정한 수신 신호 레벨을 유지하기 위해서 기지국 송신 전력을 선형적으로 줄일 수 있다.

식 (6)와 식(7)은 송신단에서 최적의 부호를 사용하여 수신단에서 최적을 알고리즘을 사용하였을 때, 얻을 수 있다. 하지만 실제 기지국에서는 최적 알고리즘의 복잡도의 문제로 인하여 준 최적 (sub-optimal) 알고리즘을 사용한다. 예를 들어 상향링크에서 기지국에서 간단한 정합 필터

수신기를 사용할 경우 성능은 식 (5)에 나타나 있다. 이 식으로부터 전체 전송 용량은 (7)과 같음을 알 수 있다.

〈그림 2〉는 기지국 안테나 수를 증가시키면서 Massive MIMO 채널 용량을 보였다. 시뮬레이션은 7개의 육각형 셀 (기지국간 거리는 2Km) 을 발생시키고, 셀 당 10 명의 사용자가 균등하게 분포해 있다고 하였다.

시뮬레이션 결과를 보면, 기지국의 안테나수가 증가함에 따라 Massive MIMO의 채널 용량이 로그에 따라 계속 증가함을 확인할 수 있다. 그리고 간단한 정합 필터가 최적 성능에 가까운 성능을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 해결해야 할 문제점

앞서 설명한 Massive MIMO의 채널 용량, 송신 전력, 복잡도에 대한 장점들은 이상적인 상황에서 얻을 수 있지만, 실제 무선 채널 환경과 구현 관점에서 보면 극복해야 할 다양한 문제점들이 존재한다. 구현상의 문제점으로 작은 면적에 다수의 안테나를 장착할 때, 각 안테나의 RF 회로간의 신호가 영향을 미치는 mutual coupling 문제, TDD를 사용하는 Massive MIMO에서 상향링크 채널을 하향링크 빔형성에 사용할 때, 송신기와 수신기 간의 calibration 문제, 다수의 안테나에서 송수신된 신호를 모으기 위해서 필요한 광대역 데이터 버스 (data bus) 설계 문제 등이다. 이러한 구현 이슈 이외에도 안테나 수가 많아지면서 기준과는 다른 다양한 문제점이 생기게 된다. 여기서는 그 중 중요한 파일럿 오염 문제, 수신기 복잡도 문제, PAR 문제에 대하여 알아본다.

RF 회로간의 신호가 영향을 미치는 mutual coupling 문제
송신기와 수신기 간의 calibration 문제
광대역 데이터 버스 (data bus) 설계 문제
추정 오차가 있는 채널을 빔형성에 사용하면 기지국의 안테나 수를 증가시켜도 간섭이 사라지지 않는 현상이 발생하고 이 현상을 파일럿 오염 (pilot contamination)

1. 파일럿 오염 문제

시분할 듀플렉스를 사용하는 Massive MIMO는 채널 정보를 추정하기 위해서 직교 파일럿을 사용자에게 분배한다. 하지만 사용자와 기지국 간의 최대 상관 시간 T가 정해져 있으므로, 사용자에게 할당할 수 있는 최대 직교 파일럿의 수는 T-1이다. 따라서 각 기지국은 최대 T-1명의 사용자의 채널을 분리하여 추정할 수

있다. 하지만, 각 기지국에서 사용하는 파일럿을 공유하고 있으므로 특정 파일럿을 사용하는 사용자는 셀의 숫자만큼 존재한다. 따라서 사용자가 아무리 높은 전력으로 파일럿을 송신하여도 각 기지국에서 사용자의 채널을 완벽히 추정하는 것은 불가능하다. 그리고 추정 오차가 있는 채널을 빔형성에 사용하면 기지국의 안테나 수를 증가시켜도 간섭이 사라지지 않는 현상이 발생하고 이 현상을 파일럿 오염 (pilot contamination)이라고 한다^[7].

파일럿 오염 문제를 알아보기 위하여 각 셀에 한 명의 사용자가 존재하고 동일한 파일럿을 사용하고 동일한 시간에 송신한다고 가정하자. 그리고 편의상 잡음은 없다고 가정한다. 그러면 l번째 기지국에서 추정된 채널은 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{g}}^{[l]} = \sum_{m=1}^L \mathbf{g}^{[m]} \quad (9)$$

추정된 채널을 이용한 정합 필터를 사용하면, 즉, $\mathbf{f}^{[l]} = \hat{\mathbf{g}}^{[l]} / N$ 을 사용하면 점근적인 SINR은 다음과 같다^{[7][14]}.

$$SINR^{[l]} \xrightarrow{a.s.} \frac{(\beta^{[l]} p^{[l]})^2}{\sum_{n=1, n \neq l}^L (\beta^{[n]} p^{[n]})^2} \quad (10)$$

따라서 식 (10)으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 채널을 완벽하게 추정할 수 있는 경우와는 달리

기지국의 안테나 수를 아무리 많이 늘려도 사용자의 SINR은 더 이상 늘어나지 않게 된다.

- 모든 사용자의 송신 전력이 동일하다고 가정하면, Massive MIMO로 얻을 수 있는 최대 SINR은 기지국과 기지국 간의 소규모 페이딩 (small-scale fading)과는 독립이고 대규모 페이딩 (large-scale fading)의 값에 따라 결정된다.

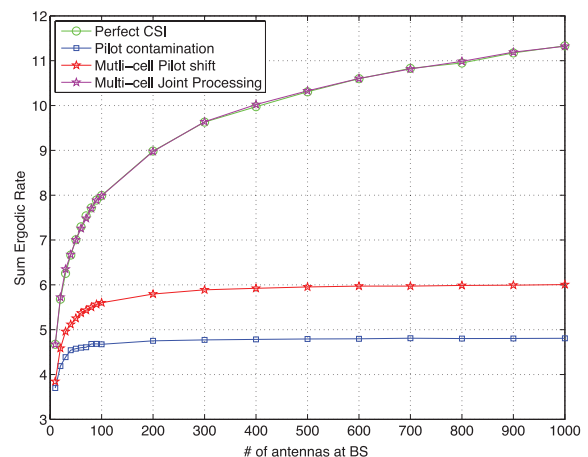
이 문제점을 해결하기 위하여 다양한 방법이 소개되어 있다. 필요한 정보의 수준에 따라 나누어 보면 1) 다중 셀 파일럿 이동 (multi-cell pilot shift)^{[15][16]}, 2) 다중 셀 협력 스케줄링 (multi-cell joint scheduling)^[17], 3) 다중 셀 협력 전송 (multi-cell joint transmission)^[18]으로 나눌 수 있다. 다중 셀 파일럿 이동 기법은 인접 기지국 간 온라인 정보교환 없이, 파일럿을 보내는 시간을 어긋나게 하도록 프레임 구조를 약속하는 방법이다. 예를 들어, 두 셀이 존재하고 최대 상관 시간이 T라고 하면, 셀 1에서는 0~T/2에 파일럿을 송신, T/2~T에 데이터를 전송하고, 셀 2에서는 0~T/2에 데이터를 전송, T/2~T에 파일럿을 전송한다. 따라서 두 셀 간의 동일한 파일럿이 동시에 전송되지 않으므로 파일럿 오염현상을 줄일 수 있다. 하지만 이 방법으로 모든 셀의 파일럿의 충돌을 피할 수는 없다. 다중 셀 협력 스케줄링 방법은 무선채널의 arrival of angle (AoA) 정보를 인접 기지국 간에 교환하여, 파일럿 충돌의 영향이 적게 발생하는 사용자들을 스케줄링한다. 하지만 이 방법은 스케줄링할 수 있는 사용자들의 수가 충분이 많은 경우에만 성능을 낼 수 있다. 다중 셀 협력 전송 방식은 기지국 간 대규모 페이딩 정보와 전송할 신호 또는 수신한 신호를 교환하여, 파일럿 충돌로 발생하는 간섭을 다중셀 간 협력 프

다중 셀 파일럿 이동 (multi-cell pilot shift)
다중 셀 협력 스케줄링 (multi-cell joint scheduling)
다중 셀 협력 전송 (multi-cell joint transmission)
파일럿 오염 문제는 파일럿을 통한 채널 추정으로 인하여 발생하므로, 블라인드 방식의 채널 추정이나, 채널 정보 없이 다중 안테나를 이용하여 송수신하는 방법에 대한 연구가 필요

로세싱으로 해결한다. 이 방식은 파일럿 오염 문제를 완벽하게 해결 할 수 있는 방법이지만, 모든 기지국이 협력하여야 하고 정보 교환을 위해서 기지국 간의 고용량 백홀망이 필요하기 때문에 실제 네트워크에 사용하기 제한적이다. 지금까지 소개한 방식들은 파일럿 오염 문제를 근본적으로 해결 할 수 없다. 파일럿 오염 문제는 파일럿을 통한 채널 추정으로 인하여 발생하므로, 블라인드 방식의 채널 추정이나, 채널 정보

없이 다중 안테나를 이용하여 송수신하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

〈그림 3〉은 파일럿 오염 현상을 알아보기 위한 시뮬레이션 결과로, 기지국의 안테나 수를 증가시키에 따라 Massive MIMO의 채널 용량을 그렸다. 수신 방식은 간단한 정합 필터를 사용하였다. 채널 추정이 완벽할 때는 안테나 수가 늘어남에 따라 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 파일럿 오염 현상이 발생하면 안테나 수가 늘어나도 성능이 증가하지 않음을 확인할 수 있다. 여기서 다중 셀 파일럿 이동 방식을 사용하면 Massive MIMO의 채널 용량은 증가하나 파일럿 오염



〈그림 3〉 파일럿 오염 현상이 존재할 때 Massive MIMO 채널 용량 (T=20, K=10, L=7)

현상이 여전히 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 끝으로 다중 셀 협력 전송 방식을 사용하면 기지국 안테나 수가 증가하면 계속하여 채널 용량이 증가하므로 파일럿 오염 현상을 극복 할 수 있음을 확인 할 수 있다.

2. 수신기 복잡도 문제

Massive MIMO는 식 (2)의 FP 특성을 이용한 간단한 정합 필터 수신기로 송신된 신호를 검출할 수 있다. 하지만 FP 특성은 이론적으로 기지국 안테나가 무한대 일 때, 성립하므로 안테나 개수가 유한한 실제 환경과는 거리가 있다. 따라서 Massive MIMO의 수신 방법은 기지국의 안테나가 적거나 유한한 숫자일 때도 높은 성능을 보여야 할 뿐만 아니라 안테나가 증가할수록 높은 성능 증가율을 가지고 있는 수신기 개발이 필요하다.

일반적으로, N 개의 기지국 안테나를 이용하여 K 명의 사용자의 신호를 검출하는 최적의 방법은 최대 우도비 (ML: maximum likelihood) 수신기를 이용하는 것이다. 하지만 최대 우도비 수신기의 복잡도는 사용자 수에 지수에 따라 증가한다. 즉, 사용한 성상도가 집합 S 라고 할 때, 최대 우도비 수신기의 복잡도는 $O(MK|S|^K)$ 이다. 다수의 기지국 안테나와 다수의 사용자를 사용하는 Massive MIMO에서는 최대 우도비 수신기의 복잡도가 너무나도 커서 사용할 수 없다. 따라서 저복잡도를 갖는 수신기 알고리즘이 필요하다.

가장 간단한 수신기 알고리즘은 선형 필터를 이용하는 것으로, 정합 필터^[19], Zero-forcing (ZF) 필터^[19], MMSE 필터^[19]가 있다. 여기서 정합 필터는 추정된 채널을 필터 계수로 사용하므로 복잡도는 $O(M)$ 이고, ZF 필터와 MMSE 필터는 역행렬 연산이 필요하므로 복잡

도는 $O(KM)$ 이다. 이러한 선형 필터는 낮은 복잡도를 장점으로 갖지만 최대 우도비 수신기 대비 성능이 매우 떨어진다.

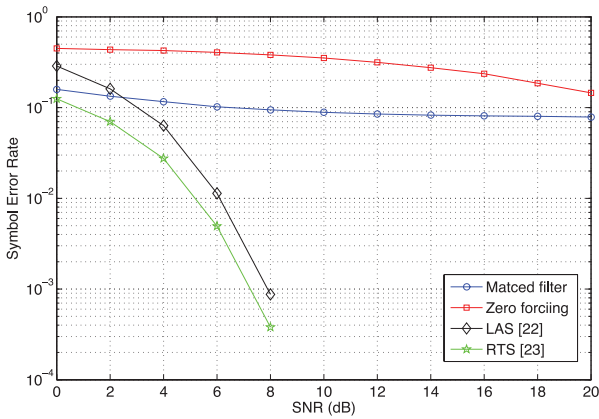
낮은 복잡도를 갖으면서 최대 우도비 수신기에 근접한 성능을 갖는 트리 검색 (tree search) 수신기로 스피어 (sphere) 수신기^{[20][21]}가 있다. 스피어 수신기는 모든 가능한 성상도를 검색하는 것 대신에 수신 신호로부터 정해진 반지름 R 안에 있는 점들만을 검색하여 복잡도를 낮춘다. 하지만 스피어 수신기의 평균 복잡도는 최대 우도비 수신기와 동일한 증가 속도인 $O(MK|S|^K)$ 라고 알려져 있으며, 높은 복잡도로 인하여 Massive MIMO에 사용이 제한적이다.

Massive MIMO에서 주로 사용하는 임의 검색 (Random search) 수신기 계열이다. 대표적으로 Likelihood ascent search (LAS)^[22]과 Reactive tube search (RTS)^[23]가 있다. LAS 알고리즘은 정합 필터 또는 ZF 필터, MMSE 필터를 이용하여 찾은 성상도 점으로부터 한 사용자의 신호를 무작위로 바꾸어서 우도비가 증가하면 찾은 점을 업데이트 하는 작업을 반복한다. 이러한 방식은 글로벌 최적에 도달하지 못 한다는 단점이 존재한다. 이를 극복하기 위해서 RTS는 LAS와 유사한 업데이트 방식을 가지나 우도비가 감소 하더라도 점을 업데이트하여 더 나은 로컬 최적을 찾을 수 있다. 이 두 방식은 복잡도 증가율 관점에서 선형 필터와 다르지 않다. 즉, LAS와 RTS 알고리즘의 복잡도는 $O(KM)$ 이다. 하지만 임의 검색 수신기 계열의 성능은 여전히 최적의 수신기의 성능에 비하여 상당히 떨어지므로 저 복잡도 고 성능 수신기 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

<그림 4>에서는 여러 수신기의 성능을 알아보기 위한 시뮬레이션 결과로, SNR을 증가시키에 따라 비트 에러 확률 (SER: symbol error probability)을 그렸다. 기지국에는 100개의 안테나가 있고 사용자가 100명 있고, 채널 정보는 완벽하게 안다고 가정하였다. 선형 수신기인 정합 필터, ZF 필터 성능은 LAS와 RTS 알고리즘에 비하여 상당히 안 좋은 것을 확인할 수 있다. 그리고 10^{-3} 이 목표 SER이라고 했을 때,

<표 1> 다양한 수신기 알고리즘에 따른 복잡도

알고리즘	복잡도
정합 필터 ^[19]	$O(M)$
제로 포싱 또는 MMSE 필터 ^[19]	$O(KM)$
최대 우도비 수신기 ^[19]	$O(MK S ^K)$
스피어 수신기 ^[20]	$O(MK S ^K)$
LAS ^[22] 또는 RTS ^[23] 수신기	$O(KM)$



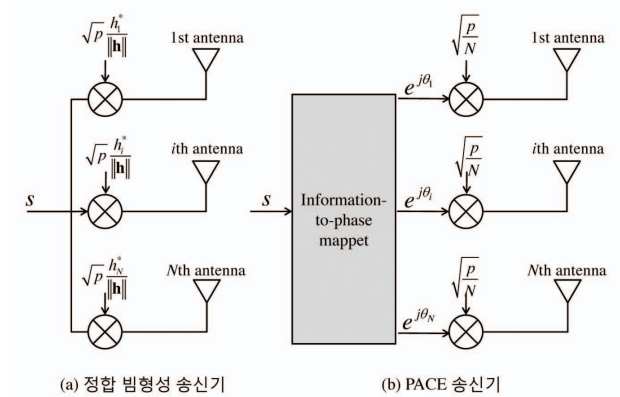
〈그림 4〉 Massive MIMO 성능 및 복잡도 (N=100, K=100)

RTS 알고리즘은 LAS 알고리즘 대비 0.84dB 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

3. PAR 문제

현재 LTE에서 사용하고 있는 직교 분할 다중 (OFDM: Orthogonal frequency division multiplexing) 방식은 다수의 부반송파 (subcarrier)들의 합으로 인하여 높은 PAR (Peak-to-average power ratio)을 가진다^[9]. Massive MIMO는 다수의 사용자의 신호가 더해져서 각 안테나에서 출력되어야 하므로 OFDM과 유사한 PAR문제가 발생한다. 예를 들어, 기지국에서 보내야 하는 신호가 s , 송신 전력이 p , 사용자와 N 개의 기지국 안테나 간의 채널이 h 이고 정합 빔포밍을 한다면, i 번째 안테나에서 출력하는 송신 신호는 $\sqrt{p}h_i^*s/\|h\|$ 이다. 따라서 각 안테나에서 출력되는 신호의 파워는 최소 0에서 최대 p 까지를 갖는다. 특히 이러한 PAR 문제는 각 안테나마다 증폭기를 필요로 하는 Massive MIMO에서 심각하다.

이 문제점을 해결하기 위하여 제안된 방식은 Per-Antenna Constant-Envelope (PACE) 송신 방법이다^{[24][25]}. 이 방식은



〈그림 5〉 PAR을 고려한 Massive MIMO 송신기 구조 [24]. (a) 정합 빔형성 송신기. (b) Per-antenna constant-envelope (PACE) 송신기

Massive MIMO의 각 안테나에서 출력하는 신호의 전력을 일정하게 유지하고 정보를 신호의 위상 (phase)에 실어 보낸다. PACE를 송신할 신호 s 를 N 개의 위상들 $e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N}$ 을 생성하고 총 전력을 맞추기 위하여 각 안테나에 $\sqrt{p/N}$ 를 곱하여 송신한다. 즉, 기지국의 i 번째 안테나에서 출력되는 신호는 $\sqrt{p/N}e^{j\theta_i}$ 이고, 각 안테나에서 출력되는 신호는 전력을 항상 $\sqrt{p/N}$ 로 일정하므로 PACE 송신 방법은 PAR이 1이다. [24]에서는 PACE 방식을 사용할 때 얻을 수 있는 SINR 이득이 안테나 수에 따라 비례함을 보였고, 즉, $SINR \sim O(N)$, 이는 식 (5)와 동일한 증가율을 확인할 수 있다. 하지만 PACE 방식은 송신기에서 보낼 신호를 위상으로 바꾸는 과정과 수신기에서 위상을 검출하여 신호를 복원하는 과정이 필요하기 때문에 복잡하다. 또한 PAR을 1로 고정하는 하였기 때문에, 안테나가 적

을 때, 채널 용량이 상당히 떨어진다라는 단점을 가지고 있다. 따라서 적은 PAR을 가지면서 복잡도가 낮은 송수신 방법에 대한 연구가 필요하다.

하지만 Massive MIMO 시스템을 구현하기 위해서는 파일럿 오염 문제, 수신기 복잡도 문제, PAR 문제 등이 존재하며, B4G 시스템에서 Massive MIMO 기술을 적용하기 위해서는 이러한 문제들을 효과적으로 해결하기 위한 연구가 필요

IV. 결론

본 논문에서는 B4G 이동통신

시스템의 핵심기술로 각광받고 있는 Massive MIMO 기술에 대하여 알아보았다. Massive MIMO 기술은 수백 개 이상의 기지국 안테나를 이용하여 다른 셀에서 발생하는 간섭을 통계적으로 제거할 수 있으며 전송 용량, 송신 파워, 프로세싱 복잡도 관점에서 이득을 소개하였다. 하지만 Massive MIMO 시스템을 구현하기 위해서는 파일럿 오염 문제, 수신기 복잡도 문제, PAR 문제 등이 존재하며, B4G 시스템에서 Massive MIMO 기술을 적용하기 위해서는 이러한 문제들을 효과적으로 해결하기 위한 연구가 필요하다.

Acknowledgement

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임 (No.2012-0001571)

참 고 문 헌

- [1] R. Andrew, "2020 : The ubiquitous heterogeneous network Beyond 4G," ITU Kaleidoscope, 2011.
- [2] M. Baker, "From LTE-advanced to the future," IEEE Commun. Mag., vol. 50, no. 2, pp.116-120, Feb. 2012.
- [3] Z. Hasan, H. Boostanimehr, and V. K. Bhargava, "Green cellular networks: A survey, some research issues and challenges," IEEE Commun. Surveys and Tutorials, vol. 13, no. 4, pp. 524-540, Nov. 2011.
- [4] C. Han et al., "Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks," IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 6, pp. 46-54, 2011.
- [5] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays," IEEE Signal Proces. Mag., vol. 30, no. 1, pp. 40-46, Jan. 2013.
- [6] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO Systems," IEEE Trans. Commun., 2012, accepted.
- [7] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [8] R. Couillet and M. Debbah, "Signal processing in large systems: a new paradigm," IEEE Signal Proces. Mag., vol. 30, no. 1, pp. 24-39, Jan. 2013.
- [9] C. Studer and E. G. Larsson, "PAR-aware large-scale multi-user MIMO-OFDM downlink," IEEE J. Sel. Areas Commum., vol. 31, no. 2, pp. 303-313, Feb. 2013.
- [10] G. Boudreau et al., "Interference coordination and cancellation for 4G networks," IEEE Commun. Mag., vol. 47, no. 4, pp. 74-81, Apr. 2009.
- [11] D. Lee, et al., "Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: deployment scenarios and operational challenges," IEEE Commun. Mag., vol. 50, no. 2, pp. 148-155, Feb. 2012.
- [12] H. Cramer, Random Variables and Probability Distributions. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1970.
- [13] B. Gopalakrishnan and N. Jindal, "An analysis of pilot contamination on multi-user MIMO cellular systems with many antennas," in Proc. Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), San Francisco, CA, June 2011.
- [14] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and S. Vishwanath, "Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD Systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 10, no. 8, pp. 2640-2651, Aug. 2011.
- [15] F. Fernandes, A. Ashikhmin, and T. L. Marzetta, "Interference reduction on cellular networks with large antenna arrays," in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), Ottawa, Canada, Jun. 2012.



[16] F. Fernandes, A. Ashikhmin, and T. L. Marzetta, "Inter-cell interference in noncooperative TDD large scale antenna systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 192–201, Feb. 2013.

[17] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, and Y. Liu, "A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 264–273, Feb. 2013.

[18] A. Ashikhmin and T. L. Marzetta, "Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems," in *Proc. International Symp. on Inf. Theory (ISIT)*, July 2012.

[19] E. G. Larsson, "MIMO detection methods: how they work," *IEEE Signal Proces. Mag.*, vol. 26, no. 3, pp. 91–95, 2009.

[20] E. Agrell, T. Eriksson, A. Vardy and K. Zeger "Closest point search in lattices", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 48, no. 8, pp. 2201–2214 2002

[21] K. J. Choi and K. S. Kim, "Hierarchical tree search for runtime constrained soft-output MIMO detection," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 2, pp. 890–896.

[22] K. V. Vardhan, S. K. Mohammed, A. Chockalingam, and B. S. Rajan, "A low-complexity detector for large MIMO systems and multicarrier CDMA systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 3, pp. 473–485, Apr. 2008.

[23] N. Srinidhi, T. Datta, A. Chockalingam, and B. S. Rajan, "Layered tabu search algorithm for large-MIMO detection and a lower bound on ML performance," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 11, pp. 2955–2963, Nov. 2011.

[24] S. K. Mohammed and E. G. Larsson, "Single-user beamforming in large-scale MISO systems with per-antenna constant-envelope constraints: the doughnut channel, *IEEE Trans. Wireless Commun.*,

accepted.

[25] S. K. Mohammed and E. G. Larsson, "per-antenna constant envelope precoding for large multi-user MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, accepted.



최경준

2010년 2월 연세대학교 전기전자공학부 학사
 2010년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학부 석박사 통합과정

〈관심분야〉

Massive MIMO, Random matrix theory, 통계적 신호 처리



김광순

1994년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 학사
 1996년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
 1999년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 박사
 1999년 3월~2000년 3월 Dept. ECE, UC San Diego, 박사후연구원
 2000년 4월~2004년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원
 2004년 3월~2008년 2월 연세대학교 전기전자공학부 조교수
 2009년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수

〈관심분야〉

통신이론, 변복조 방식, 다중사용자/다중셀 다중안테나 시스템, 애드혹(ad-hoc) 및 이종 셀룰러 네트워크의 용량 및 계층간 최적화