



5G Massive MIMO 실현을 위한 연구 동향



이길원
KAIST



성영철
KAIST



소정호
KAIST



서준영
KAIST

I. 서론

과거 단순한 문자 메시지 전송 및 음성 통화 서비스만을 제공하던 무선 단말기는 현재 실시간 HD급 고품질 동영상 시청 및 화상 통화 서비스를 포함한 다양한 애플리케이션의 기능을 소화할 수 있는 스마트 기기로 진보하였고, 더 이상 일상생활 속에 없어서는 안 될 필수품이 되었다. 이제는 더 나아가 3차원 홀로그래픽 동영상 시청, 실감미디어, 사물인터넷 서비스 등과 같은 초고속, 초연결, 초저지연 통신을 기반으로 한 새로운 애플리케이션이 가까운 미래에 등장할 것으로 보인다.

이 같은 고품질의 서비스를 실현하기 위해서 미국을 포함한 유럽, 한국, 중국, 일본 등 전 세계 여러 나라에서 2020년 상용화를 목표로 5G 이동 통신 시스템을 개발하고 있다.

특히, 유럽의 METIS 프로젝트에서는 “최고의 경험이 당신을 따라다닌다.” (“Best experience follows you.”)라는 슬로건을 내걸고 5G 이동통신 시스템 개발을 주도하고, 4G 대비 높은 요구량을 실현시키는 것을 목표로 하고 있다^[1]. 5G 이동 통신 시스템의 구체적인 설계 목표는 현재에도 새롭게 정의되고 진화하고 있지만, 가장 기본적인 5G 이동 통신 시스템의 성능 목표 요구량은 1) 면적당 데이터 윌 1000배 증가, 2) 사용자당 데이터 윌 10~100배 증가, 3) 면적당 연결된 디바이스 10~100배 증가, 4) 에너지 효율 1000배 증대이다^[1]. 이러한 요구를 맞추기 위하여 개발되고 있는 여러 기술들 중 하나인 massive MIMO (multiple input multiple

가장 기본적인 5G 이동 통신 시스템의 성능 목표 요구량은
 1) 면적당 데이터 윌 1000배 증가,
 2) 사용자당 데이터 윌 10~100배 증가,
 3) 면적당 연결된 디바이스 10~100배 증가, 4) 에너지 효율 1000배 증대이다^[1].

output) 기술은 다수의 안테나를 사용하여 적절한 빔형성을 통해 사용자간 간섭을 공간적으로 제거하고 송신 에너지를 최소화하는 동시에 다수의 단말기를 지원하는 기술로, 5G 이동 통신을 위한 핵심 기술로 자리매김하고 있다^[2]. 하지만, massive MIMO의 장점을 얻는데 채널 추정 문제, 하드웨어 복잡도 증가 및 장애 등과 같은 여러 가지 현실적인 문제점들이 있고 이를 해결하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다.

본 논문에서는 massive MIMO의 기초 원리를 먼저 살펴보고, 많은 수의 안테나를 사용하면서 발생하는 현실적인 문제점들을 소개한 뒤, 이를 해결하기 위해 현재까지 제안된 여러 가지 방법들, 구체적으로 파일럿 신호 설계와 채널 추정 방법, 효율적인 빔포머 구조 및 설계 알고리즘, 효율적인 스케줄링 알고리즘을 소개하고, 이와 관련된 여러 최신 결과들을 간략하게 소개하고자 한다. 또한, 본 논문에서 고려하는 시스템을 셀룰러 대역만으로 한정하지 않고, 밀리미터파 (millimeter wave) 대역까지 고려하여 massive MIMO 기술의 연구 동향을 소개하고자 한다.

II. Massive MIMO 이상적 기초 원리

먼저 기본적인 massive MIMO의 개념을 알기 위해 단일 셀 다중 사용자 MIMO 시스템을 고려하자. 기지국은 N_t 개의 안테나를 가지고 있고 셀 내 K 명의 단일 안테나의 사용자가 있다고 가정하자. 그리고 기지국과 사용자 i 와의 채널을 h_i (크기가 $N_t \times 1$ 벡터)라고 하고, 각 원소들이 평균이 0이고 분산이 1라고 두고, 모든 원소별로 독립이고 같은 확률 분포를 따르는 이상적 rich scattering 환경을 가정하면, 큰 수의 법칙(law of large numbers)에 의하여 다음이 만족한다.

$$\frac{1}{N_t} \mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_j \rightarrow \delta_{ij}, \text{ as } N_t \rightarrow \infty.$$

여기서, δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. 즉, 위와 같이 이상적인 rich scattering 환경에서는, 각 사용자의 채널

은 기지국의 안테나 수 N_t 가 증가함에 따라 서로 점근적으로 (asymptotically) 직교성을 가지게 되어 공간적으로 분리가 된다. 따라서, 기지국이 maximum ratio transmission (MRT, 정합필터)와 같은 아주 간단한 선형 빔포머를 사용하여도 사용자간 간섭을 없애면서 자신의 채널에 정합되어 높은 데이터 유효를 얻을 수 있다. 좀더 자세히 말하면, 최소평균제곱오차 (minimum mean square error; MMSE), zero-forcing (ZF), MRT 빔포머들과 같은 선형 빔포머를 사용해도 각 사용자의 신호 대간섭더하기잡음비 (signal-to-interference-plus-noise ratio; SINR)가 안테나의 수 N_t 에 선형적으로 증가함이 알려져 있다^[3]. 또한, 전체 전송 용량이 기지국의 안테나의 수에 로그적으로 증가하고, 사용자의 수에 따라 선형적으로 증가함이 알려져 있고, 일정한 SINR을 유지하는데 기지국의 송신 전력을 안테나의 수에 반비례하여 줄일 수 있다는 것이 알려져 있다^[3].

FDD 기반 massive MIMO 시스템에서는 TDD 기반 massive MIMO 시스템에서처럼 간단히 채널의 상하향 가역성에 기반한 채널 추정이 불가능하기 때문에 효율적인 하향링크 채널 추정이 필수적이다.

하지만, 이와 같은 massive MIMO의 장점을 얻기 위해서는 기지국과 각 사용자 간 채널 상태 정보 (channel state information; CSI)를 정확히 알아야 하고 이를 기반으로 MMSE, ZF, MRT와 같은 적절한 빔포머를 설계해야 한다. 그러나, 기존 MIMO보다 훨씬 많은 수의 안테나를 사용하는 massive MIMO 기술에서는 채널 추정을 위해 필요한 오버헤드가 매우 크기 때문에 주어진 채널상관시간 (channel coherence time) 내에 정확히 채널 추정을 하기가 쉽지 않다. 그리하여, 지금까지 massive MIMO 시스템에 관한 많은 연구들이 상향링크와 하향링크 간의 채널 가역성 (channel reciprocity) 성질을 갖는 시분할 듀플렉스 (time division duplex; TDD) 방식을 고려하여 진행되고 있다^[4-8]. TDD 시스템에서는 채널 추정을 위해 사용자마다 서로 직교하는 파일럿 신호를 상향링크로 전송하여 기지국이 각 사용자의 상향링크 채널을 추정된 뒤 채널 가역성을 이용하여 하향링크 채널을 추정할 수 있다¹⁾. 이러한 TDD 방식을 이용하면,

1) TDD 시스템에서 하향링크 채널 추정방식은 기존의 상향링크 채널 추정방식이라고 간주할 수 있다.



채널 정보를 얻기 위한 직교 파일럿 신호의 길이가 동시 사용자의 수 K 에 비례하고 기지국의 안테나의 수 N_t 와 무관하기 때문에 massive MIMO 시스템을 위한 채널 추정 오버헤드를 줄일 수 있다. 따라서, 시스템이 수용하는 최대 Mobility 등 채널 자체의 특성에 의해 정해지는 채널상관시간 T_c 만큼 최대 직교 파일럿의 수를 만들 수 있어서 $K=T_c$ 명 까지 직교 파일럿 신호를 이용하여 동시에 채널 정보를 획득할 수 있다. 하지만, 보통의 경우 채널상관시간 내에 채널정보 획득과 정보 전송이 둘 다 이루어져야하므로, $T_c/2$ 이하의 직교 파일럿 수를 이용하여 $K < T_c/2$ 명의 사용자 수를 동시에 지원할 수 있다.

TDD 기반 다중 셀의 경우에는 자신의 셀 내에 사용자들은 서로 직교하는 파일럿 신호를 사용하지만, 다른 셀 내에서 사용되는 파일럿 신호들과는 최대로 직교할 수 있는 공간의 차원($T_c/2$)의 한계로 인해 파일럿들이 서로 직교하지 않고 겹치게 된다. 따라서, 사용자가 자신의 기지국에게 파일럿 신호를 보낼 때, 다른 셀에서 겹치는 파일럿 신호를 사용하는 사용자가 보낸 파일럿 신호도 자신의 기지국에 도달하게 되어, 기지국은 원하는 채널 성분뿐만 아니라 간섭 채널 성분도 포함하여 채널을 추정하게 된다. 이 추정 오차가 있는 채널을 기반으로 기지국이 하향 빔포밍을 하게 되면 안테나의 수를 아무리 증가시켜도 간섭이 사라지지 않는 현상이 발생하여 성능의 한계가 생기게 되는데, 이 같은 현상을 파일럿 오염 (pilot contamination) 이라고 한다^[4]. 이를 해결하기 위하여 현재 다양한 방법으로 많은 연구가 이루어지고 있다^[5-8]. TDD 기반 massive MIMO 시스템을 가정하면, 기지국의 안테나의 수에 무관히 채널 추정이 가능한 장점이 있기 때문에 효율적인 채널 추정방식에 대한 연구보다 파일럿 오염을 어떻게 줄이느냐에 대한 연구가 활발히 연구되고 있다.

III. Massive MIMO에서의 파일럿 신호 설계와 채널 추정

실제의 TDD 시스템에서는 하향/상향링크의 RF (Radio frequency) chain의 calibration 오차와 같은 하드웨어적 불완전성으로 인해, 채널 가역성을 이용한 하향링크 채널정보추정은 정확하지 않을 수 있다^[9,11,12]. 또한, 현재 대부분의 무선 통신 시스템은 고속의 회로 스위칭이 필요 없는 주파수 분할 듀플렉스 (frequency division duplex; FDD) 방식을 사용하기 때문에, TDD 기반 massive MIMO 시스템의 단점을 극복하기 위해 FDD 기

반 massive MIMO 시스템 또한 활발히 연구되고 있다. 이 FDD 기반 massive MIMO 시스템에서는 TDD 기반 massive MIMO 시스템에서처럼 간단히 채널의 상하향 가역성에 기반한 채널 추정이 불가능하기 때문에 효율적인 하향링크 채널 추정이 필수적이다^[11,12]. 아래에서는 FDD massive MIMO 방식에서 효율적인 채널추정 방식에 관해

이러한 효율적인 채널 추정은 송신단에서 채널에 관한 부가적인 정보가 있을 때 가능한데, 대표적인 부가 정보로는 안테나 및 커버리지 영역의 특성에 따라 채널의 특성을 반영하는 공간적 상관성 (spatial correlation), 시간에 따라 변하는 채널의 특성을 반영하는 시간적 상관성 (temporal correlation) 등이 있다.

지금까지 알려진 몇 가지 중요한 결과들을 소개하겠다.

1. 셀룰러 대역

Massive MIMO에서는 안테나 수가 많아 각 안테나 별로 형성되는 모든 채널 값을 추정해야하므로 긴 파일럿 신호를 송신해야하고 추가적으로 많은 피드백 정보량을 요구한다. 하지만, 주어진 채널상관시간의 한계로 인해, 긴 파일럿의 신호를 채널상관시간 내에 송신하기 어려울 뿐만 아니라, 많은 피드백 정보량의 요구 또한 실제 시스템에서 충족되기 어렵다. 이를 극복하기 위해 FDD massive MIMO 시스템에서의 효율적 채널 추정을 위한 파일럿 신호 설계 기법들이 연구되었다^[10-13]. 이러한 효율적인 채널 추정은 송신단에서 채널에 관한 부가적인 정보가 있을 때 가능한데, 대표적인 부가 정보로는 안테나 및 커버리지 영역의 특성에 따라 채널의 특성을 반영하는 공간적 상관성 (spatial correlation), 시간에 따라 변

하는 채널의 특성을 반영하는 시간적 상관성 (temporal correlation) 등이 있다.

먼저 채널의 공간적 상관성을 이용하는 효율적 채널 추정 방법을 살펴보자. 가장 간단한 경우인 단일 사용자 massive MISO (multiple-input single-output) 상황을 고려하고 공간적 상관성을 적용하기 위하여 다음과 같이 MISO 채널이 평균이 0이고 공분산 행렬이 R 인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하자.

$$h \sim CN(0, R)$$

여기서, h 는 $N_t \times 1$ 벡터로 채널을 의미하고 $R = E[hh^H]$ 은 크기가 $N_t \times N_t$ 인 공분산 행렬이다. 채널의 공분산 행렬을 고유값 분해 (eigenvalue decomposition)를 하면 $R = U\Lambda U^H$ 와 같이 표현할 수 있다. 여기서, U 는 각 열벡터가 서로 정규직교 (orthonormal)하는 $N_t \times R_c$ 행렬이고 Λ 는 $R_c \times R_c$ 대각 행렬로 각 대각 요소가 R 의 0이 아닌 고유값이다. 만약, 하나의 파일럿 신호를 보낸다면, 가장 큰 고유값에 해당하는 고유벡터 방향으로 파일럿 신호를 송신하여 채널 추정을 하는 것이 작은 고유값에 해당하는 고유벡터 방향으로 파일럿 신호를 송신하는 것보다 효과적일 것이다. 이를 일반화하여 T_p 의 심볼시간 동안 파일럿 신호를 송신한다고 가정하면, 파일럿 신호의 길이 T_p 와 공분산 행렬의 고유치 대각 행렬 Λ 를 고려하여 T_p 개의 고유벡터를 선택하고 선택된 방향으로 어떻게 전력 분배를 해야 하는지를 고려해야 한다. 이를 수식적으로 표현하여 $N_t \times T_p$ 행렬 S 를 파일럿 신호로써 송신한다고 가정하면 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y = S^H h + n$$

여기서 y 와 n 는 각각 $T_p \times 1$ 수신 신호 벡터와 각 요소가 독립적이며 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 $T_p \times 1$ 가우시안 잡음 벡터를 의미한다. 이 때 채널의 공분산 행렬을 이용하면 $h = U\tilde{g}$ 와 같이 $N_t \times R_c$ 행렬과 $R_c \times 1$ 벡터의 곱으로 표현할 수 있다. 이를 이용하면 최적의 파일럿 신호 또한 $S = U\tilde{S}$ 와 같이 $N_t \times R_c$ 행렬과 $R_c \times T_p$ 행렬의 곱으로 표현할 수 있다. 이 때 채널의 MSE는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$MSE = E[(h - \hat{h})^H (h - \hat{h})] = tr\left(\Lambda^{-1} + \frac{1}{\sigma^2} \tilde{S}\tilde{S}^H\right)^{-1}$$

이를 최소화하는 파일럿 신호의 방향은 채널 공분산 행렬의 가장 큰 T_p 개의 고유치에 해당하는 고유벡터들의 방향이라는 것이 밝혀졌고 이때 Water-filling 알고리즘을 이용하면 각 벡터의 전력을 최적으로 분배할 수 있다는 것이 알려졌다^[10].

최근에는 더욱 효율적인 채널 추정을 위하여 채널의 공간적 상관성만 이용하는 것이 아니라 추가적으로 채널의 시간적 상관성까지 이용하는 파일럿 신호 설계 기법이 제안되었다^[11-13]. 이 경우 l 번째 시간 (또는 블록)의 채널을 h_l 이라하고, 채널 모델이 stationary block Gauss-Markov vector process를 따른다고 가정하면, 채널의 시간적 상관성을 다음과 같이 표현할 수 있다^[11-13].

$$h_{l+1} = \alpha h_l + \sqrt{1 - \alpha^2} b_{l+1}, b_{l+1} \sim CN(0, R), l = 0, 1, \dots$$

여기서, $\alpha \in [0, 1]$ 은 상수로 이전 시간 채널과 현재 채널의 상관 정도를 나타내고, b_{l+1} 은 이전 시간과 독립적인 채널 성분이다. 시간의 상관성을 이용할 경우 채널 공분산 행렬만을 그대로 이용하는 것이 아니라 이전 시간까지 추정해 온 기존 채널 추정 값을 고려한 채널 오차 공분산 행렬을 이용하여 설계한다. 시간 상관성을 이용하지 않을 경우 이전 시간에 추정된 채널을 현재 시간의 채널 추정에 전혀 사용하지 않기 때문에, 현재 채널 추정 오차 공분산 행렬은 채널 공분산 행렬과 일치한다. 하지만, 채널의 시간 상관성을 적절하게 이용한다면 지속적인 업데이트를 통해 시간이 지날수록 채널 추정 오차를 점점 줄여나갈 수 있다. 여기서, 채널 추정 오차 공분산 행렬의 고유값이 크다는 것은 그 고유값에 해당하는 고유벡터의 방향의 채널에 대한 오차가 크다는 것을 의미한다. 따라서, 채널 추정 오차 공분산 행렬의 고유값이 큰 고유벡터 방향으로 파일럿 신호를 송신해준다면 효과적인 채널 추정이 가능하다는 것을 짐작할 수 있다. Gauss-Markov 채널 모델 하에서 시간 상관성을 이용하기 위해서는 최적의 추정기인 칼만 필터를 사용하고, 이를 통해 각 시간별 채널 추정 오차 공분산 행렬의 업데이트를 수행한다. 이 경우 각 시간의 파일럿 신호의 전력 분배를 고려하지 않을 경우 채



널의 MSE를 최소화하는 파일럿 신호는 다음과 같이 구할 수 있다^[11].

$$\mathbf{S} = \sqrt{\rho} \mathbf{U}_{[1:T_p]} \text{ where } \rho = \frac{P}{\sigma^2}, \mathbf{R}_{[l:l-1]} = \mathbf{U}_l \mathbf{\Lambda}_l \mathbf{U}_l^H$$

여기서, $\mathbf{U}_{[1:T_p]}$ 은 \mathbf{U}_l 행렬의 첫 번째부터 T_p 번째 열벡터로 이루어진 행렬을 의미하고, P 는 송신 전력을 의미한다. $\mathbf{R}_{[l:l-1]}$ 은 $l-1$ 번째까지의 파일럿 신호를 바탕으로 추정된 채널 추정 오차의 공분산 행렬로 $\text{tr}(\mathbf{R}_{[l:l-1]})$ 의 경우 채널의 MSE를 의미한다. 이 결과^[11]와 기존 결과^[10]의 핵심적 차이는 공간적 상관성만 이용하는 기존 결과^[10]에서는 채널의 공분산 행렬의 T_p 개의 주 고유벡터를 파일럿 신호로 사용하지만, 시공간 모두의 상관성을 이용하는 새 방식에서는 최적 채널 추정의 채널 추정 오차 공분산 행렬의 T_p 개의 주 고유벡터를 파일럿 신호로 사용하는 것이다. 이와 같이 MISO 시스템에서 전력 분배를 고려하지 않는다면 채널의 MSE를 최소화 하는 파일럿 신호를 닫힌 꼴로 구할 수 있고, 전력 분배를 고려하더라도 시간 상관성을 고려하지 않는다면 Water-filling 알고리즘을 통해 최적의 파일럿 신호를 구하는 것이 가능하다. 하지만, MIMO 시스템의 경우 MISO와는 다르게 채널 추정이 좀 더 복잡해진다. MIMO의 경우 송신 안테나간의 상관성과 수신 안테나간의 상관성을 잘 나타낸 Kronecker 채널 모델을 고려할 수 있다. 이 때 l 번째 시간의 채널은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{H}_l = \mathbf{R}_r^{1/2} \tilde{\mathbf{H}}_l \mathbf{R}_t^{1/2}$$

여기서, $\mathbf{R}_t = E[\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k]$ 와 $\mathbf{R}_r = E[\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H]$ 은 각각 $N_t \times N_t$ 송신 안테나 간의 상관성을 나타낸 송신 상관 행렬, $N_r \times N_r$ 수신 안테나 간의 상관성을 나타낸 수신 상관 행렬을 의미하고, $\tilde{\mathbf{H}}_l$ 는 각 요소가 독립이고 평균이 0인 가우시안 분포를 따르는 $N_r \times N_t$ 행렬이다. 이와 같이 행렬로 표현된 MIMO채널을 벡터화를 시켜 수신 신호를 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{S}_l^H \mathbf{h}_l + \mathbf{n}, \text{ where } \mathbf{h}_l = \text{vec}(\mathbf{H}_l), \mathbf{S}_l = \mathbf{s}_l \otimes \mathbf{I}_{N_t}$$

이 경우 MISO 시스템과는 다르게 송신 파일럿 신호가 \mathbf{I}_{N_t} 행렬과의 Kronecker 곱 꼴로 나타내어진다. 이는 MISO 시스템과는 다르게 송신 단에서 채널의 공분산 행렬 \mathbf{R}_t 의 송신 고유벡터를 파일럿 신호로 전송할 경우 수신단의 안테나 수만큼의 파라미터에 영향이 미친다는 것을 의미한다. 이에 따라 닫힌 꼴로 최적의 파일럿 신호를 표현하는 것이 어렵고, 파일럿 신호를 설계하는 알고리즘은 더욱 복잡해진다. 전력 분배를 고려하지 않는다면 공간 및 시간 상관성을 이용한 알고리즘의 경우 MISO 시스템의 경우와 같이 채널 오차 공분산 행렬을 이용하여 채널 추정 오차 공분산 행렬의 주 고유벡터(dominant eigenvectors)를 보내는 것이 매순간 채널 추정을 최소화하는 최적임이 알려졌다^[11]. 또한, 매시간의 채널 추정 오차 공분산 행렬은 원래 채널 공분산 행렬과 동시 대각화(simultaneous diagonalization by unitary similarity)가 가능하므로 초기의 채널 공분산 행렬의 고유벡터를 통해서 대각화시키는 것이 가능하다. 이에 따라 시간별로 채널 추정 오차 공분산 행렬의 고유벡터를 새롭게 구할 필요없이, 고유값만을 업데이트 하여 주고유벡터를 찾아내는 간단한 알고리즘으로도 파일럿 신호 설계가 가능함을 보였다^[11].

채널 추정 오차 공분산 행렬의 주 고유벡터(dominant eigenvectors)를 보내는 것이 매순간 채널 추정을 최소화하는 최적임이 알려졌다^[11].

원래 채널 공분산 행렬과 동시 대각화(simultaneous diagonalization by unitary similarity)가 가능하므로 초기의 채널 공분산 행렬의 고유벡터를 통해서 대각화시키는 것이

가능하다. 이에 따라 시간별로 채널 추정 오차 공분산 행렬의 고유벡터를 새롭게 구할 필요없이, 고유값만을 업데이트 하여 주고유벡터를 찾아내는 간단한 알고리즘으로도 파일럿 신호 설계가 가능함을 보였다^[11].

만약 전력 분배를 고려한다면 MISO 시스템과는 다르게 수신단의 여러 방향을 고려하여, 즉, 하나의 송신 고유벡터에 연관된 여러 고유값을 고려하여 어떤 송신 고유벡터를 어떤 전력으로 전송할지 고려해야 한다. 이 경우 하나의 고유값끼리의 비교가 아닌 여러 고유값끼리 비교해야 하고 따라서 이에 관련된 함수 간의 크기 비교가 필요하다. 이 때 최적의 전력 분배에 대해서는 알려지지 않았지만 각 송신 고유벡터에 영향 받는 고유값들의 합을 비교하여 정해진 파일럿 신호 방향에 대해서 전력 분배를 실시하는 알고리즘을 통해 효과적인 파일럿 신호를 설계할 수 있다^[11].

앞의 연구에서는 채널 추정의 MSE를 최소화하는 파일럿 신호 설계가 주로 다루어졌는데, 채널 MSE를 최소화하는 것은 수신 신호 디코딩에 간접적으로 영향을 준

다. 이에 반해 수신 신호 디코딩에 직접적으로 영향을 주는 데이터의 수신 신호대잡음비 (signal to noise ratio; SNR)을 최대화하는 것을 목표로 하는 파일럿 신호 설계에 관한 연구도 진행되었다^[13]. MISO 시스템에서의 경우 데이터의 수신 신호대잡음비 (signal to noise ratio; SNR)는 잘 정의되는데, 수신 SNR 계산을 위해 데이터를 송신하기 위한 빔포머를 고려해야 한다^[13]. 이 경우 빔포머가 정해져있기 때문에 정해진 빔포머 방향과 일치하는 방향의 채널 정보가 중요하게 되고 빔포머와 직교하는 방향의 채널 정보의 경우 필요치 않게 된다. 이에 따라 수신 SNR의 최대화를 목적으로 파일럿을 설계할 경우 채널의 MSE를 최소화하는 방향으로 파일럿을 설계하는 것과는 다른 채널 정보를 요구하고 이를 고려한다면 더 높은 수신 SNR 성능을 확보하는 것이 가능하다. 빔포머의 경우 최적의 송신 빔포머를 사용하는 것을 고려한다면 더욱 좋은 성능을 얻을 수 있다. 공간 상관성만을 고려할 경우 간단한 Water-filling 알고리즘을 통해 수신 SNR을 최대화하는 파일럿을 설계할 수 있다. 추가적으로 시간 상관성을 고려할 경우 semi-definite relaxation을 이용한 알고리즘을 통해 파일럿을 설계할 수 있다^[13].

2. 밀리미터파 대역

밀리미터파 시스템의 경우 파장이 작아서 작은 공간 안에 많은 수의 안테나 소자를 집적시킬 수 있어 massive MIMO 구현에 용이하다는 장점을 갖는 반면, 고주파 무선신호의 전송 특성상 기존 셀룰러 대역의 신호에 비해 큰 경로 손실 (path loss)를 겪는다^[14]. 따라서, 이와 같이 큰 경로 손실을 극복하면서 채널 정보를 얻으려면 파일럿 신호를 보낼 때 높은 지향성 빔포밍 (highly directional beamforming)을 수반해야 하기 때문에, 어느 방향으로 지향성 파일럿 신호를 보내야 하는지가 중요하다. 앞 절에서 보았듯이 기존의 셀룰러 대역에서의 채널 추정 연구는 송신단과 수신단 사이의 채널이 많은 수의 전파 경로를 갖는 rich scattering 환경을 가정하여, 채널을 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하고 채널 공분산 행렬을 알고 있다는 가정을 기반으로 연구가 진행되어왔다. 하지만, 밀리미터파 MIMO 시스템에서는 고주파 신

호의 높은 직진성 성질과 큰 경로 손실 성질로 인해 기존의 셀룰러 대역처럼 대부분의 방향으로 경로가 존재하는 rich scattering 환경²⁾과는 달리 매우 적은 수 (sparse)의 방향에서만 전파 경로가 존재한다. 그러므로, 밀리미터파 MIMO 채널은 다음과 같이 L 개의 경로를 갖는 sparse MIMO 채널로 모델할 수 있다^[15,16].

$$H = \sqrt{N_t N_r} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_{RX}(\theta_l^r) \mathbf{a}_{TX}^H(\theta_l^t).$$

여기서, N_t 와 N_r 은 각각 송신기와 수신기의 안테나 수이고, α_l 은 l 번째 경로의 이득, θ_l^r 와 θ_l^t 은 각각 l 번째 경로의 angle of arrival (AoA)와 angle of departure (AoD)의 정규화된 방향각³⁾을 의미한다. 또한, $\mathbf{a}_{RX}(\theta)$ 는 $\mathbf{a}_{TX}(\theta)$ 각각 수신 응답 벡터 (response vector)와 송신 조종 벡터 (steering vector)이다. Sparse MIMO 채널의 가장 큰 특징으로는 경로의 개수에 해당하는 L 값이 N_t 와 N_r 에 비해 훨씬 작다는 것이다 ($L \ll N_t, N_r$). 이를 기반으로 위 물리적인 채널 모델로부터 Sparse MIMO 채널의 특성을 이용하기 위해 가상 채널 표현 (virtual channel representation) 방법이 제안되었다^[16].

$$H = A_R H_V A_T^H$$

여기서, A_R 은 AoA의 정규화 방향 $\bar{\theta}^r$ 을 $-\frac{1}{2}$ 부터 $\frac{1}{N_r}$ 간격으로 양자화 한 각도 $\bar{\theta}_i^r = -\frac{1}{2} + \frac{i-1}{N_r}$ ($i = 1, \dots, N_r$) 들에 대한 응답 벡터를 각 열에 늘어놓은 행렬이고, A_T 행렬 또한 같은 방법으로 AoD의 정규화 방향 $\bar{\theta}^t$ 을 양자화 한 각도 $\bar{\theta}_i^t = -\frac{1}{2} + \frac{i-1}{N_t}$ ($i = 1, \dots, N_t$) 들에 대한 조종 벡터를 각 열에 늘어놓은 행렬이다. 여기서, H_V 는 가상 채널 행렬 (virtual channel matrix)이라고 불리며, 양자화 오차를 무시한다면 <그림 1>과 같이 L 개의 성분만 0

2) 채널의 공간 상관성이 있는 경우를 모델하는 복소 가우시안 분포 $CN(0, R)$ 도 rich scattering에 기반한 채널 모델이다. 다만 isotropic 하지 않기 때문에 방향별로 전파 경로의 richness가 다를 수 있다.

3) 안테나 배열이 균등 선형 배열 (uniform linear array; ULA)라고 가정하면, 물리적 각도 (AoA, AoD) θ 와 정규화된 방향각 $\theta = \frac{\theta - d \sin(\theta)}{\lambda}$ 의 관계가 있다. 여기서, d 와 λ 는 각각 안테나 간 거리이고 신호의 파장의 크기이다.

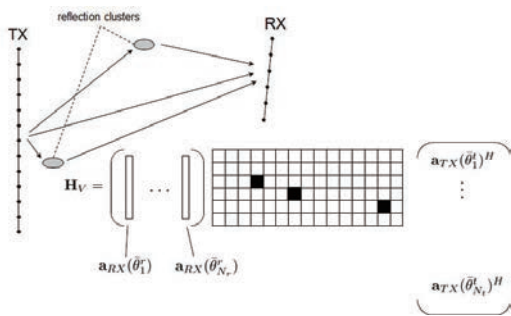
이 아닌 값을 갖게 된다. H_V 의 (i,j) 성분은 수신기의 i 번째 정규화 방향각과 송신기의 j 번째 정규화 방향각에서 바라보았을 때, $\sqrt{N_t N_r}$ 이 곱해진 경로 이득의 크기를 나타낸다. 따라서, 가상 채널 모델의 양자화 오차를 무시한다면, 밀리미터파 sparse MIMO 채널에서의 채널 추정과 파일럿 신호 설계 문제는 가상 채널 행렬 H_V 의 0이 아닌 성분들의 위치와 크기를 찾는 문제로 귀결된다.

밀리미터파 Sparse MIMO 채널에서 경로의 방향각을 추정하는 가장 쉬운 방법은 모든 방향으로 순서적으로 파일럿 빔을 송신한 다음 가장 큰 크기를 갖는 L 개의 경로를 고르는 방법이다. 하지만, 안테나의 수가 많아질수록 식별 가능한 경로의 방향의 수 또한 이에 비례하여 많아지게 되어서 다수의 안테나를 사용하는 massive MIMO 상황에서는 큰 오버헤드가 발생하게 된다. 따라서, 경로의 수가 희박하다는 성질을 효과적으로 이용하여 적은 오버헤드로 sparse MIMO 채널을 효율적으로 추정하는 방식이 필요하다.

효율적인 Sparse MIMO 채널 추정을 위하여 먼저 압축 센싱 (compressive sensing; CS) 기법에 기반하는 알고리즘이 제안되었다^[17-20]. [17]에서는 여러 시스템 모델에서의 물리적인 MIMO 채널 모델을 가상 채널 표현으로 근사한 다음 행렬 전개를 통해 모델을 다음과 같이 선형화된 꼴로 변형시켰다.

$$\bar{y}' = Ah_v + n'$$

여기서, h_v 는 가상 채널 행렬 H_V 를 벡터화한 것이고,



〈그림 1〉 양자화 오차를 무시한 가상 채널 행렬 H_V

($h_v = \text{vec}(H_V)$), A 는 송신 신호와 수신 빔포머로 디자인할 수 있는 sensing matrix이다. h_v 가 희소성을 갖는다는 특성을 이용하여 CS 기법을 h_v 의 0이 아닌 성분의 크기와 위치를 구하는데 적용하였고 채널 추정 성능을 분석하는데 사용하였다. 이와 더불어 [19,20]에서는 디지털 빔포머와 아날로그 빔포머 두 가지를 동시에 고려하는 하이브리드 시스템에서 새로운 방식의 sparse MIMO 채널 추정 방법을 제안하였다. 구체적으로 설명하면, 채널이 여러 블록 시간 동안에는 변하지 않는다는 가정 하에 각 블록마다 이전 블록의 결과를 이용하여 적응적으로 L 개의 경로의 이득과 방향을 구하는 bisection method 방식의 파일럿 신호 설계와 adaptive CS를 이용한 채널 추정 방식이 제안되었다.

효율적인 Sparse MIMO 채널 추정을 위하여 먼저 압축 센싱 (compressive sensing; CS) 기법에 기반하는 알고리즘이 제안되었다^[17-20]

또한 채널이 시간에 따라 변하는 시변 (time-varying) sparse MIMO 채널을 위한 추정 방식에 대해서도 여러 연구가 진행되었다^[17,21,22]. 먼저 [21]에서는 송신기와 수신기가 단일 안테나를 갖는 경우에서의 doubly-selective 채널에서의 채널 추정 파라미터를 구하는데 CS tool이 사용되었고 성능 분석이 이루어졌다. 더불어 [21]에서는 송신기와 수신기에 여러 개의 안테나 있고 각각 하이브리드 구조를 갖는 상황에서 precoder와 combiner를 순차적으로 갱신시키는 채널 트래킹 (tracking) 기법을 제안하였다. 여기서 sparse MIMO 채널이 시간에 따라 변화하는데 채널의 경로들의 AoD와 AoA (θ^t, θ^r)는 다음과 같이 가정되었다.

$$\begin{aligned} \theta^t(n+1) &= \theta^t(n) + \Delta\theta^t & \Delta\theta^t &\sim U(-\delta, \delta) \\ \theta^r(n+1) &= \theta^r(n) + \Delta\theta^r & \Delta\theta^r &\sim U(-\delta, \delta) \end{aligned}$$

여기서, $X \sim U(a, b)$ 는 X 가 구간 $[a, b]$ 에서 균등 분포에 따라 생성된 랜덤 변수임을 의미하고, δ 는 특정 작은 값임이 가정되었다. 최근의 연구 결과인 [23,24]에서는 각 채널 경로들의 AoA와 AoD에 해당하는 가상 채널 행렬 H_V 의 0이 아닌 성분들의 시간에 따른 위치의 변화를 Markovian random walk로 모델화하였다. 즉, H_V 의 0이 아닌 성분의 위치 (열과 행)이 특정한 변이 확률



(transition probability)를 갖고 움직인다고 모델링하고 이 모델을 기반으로 Partially observable Markov decision process (POMDP) 이론을 적용하여 밀리미터 파 sparse MIMO 채널 추정 문제를 위한 최적 파일럿 신호 설계 기법과 저복잡도의 준-최적 (sub-optimal) 파일럿 신호 설계 기법이 제안되었다. 이 POMDP 기반 파일럿 신호 설계 및 채널 추정 방식이 같은 자원을 사용할 때 낮거나 중간 정도의 SNR에서 압축 센싱에 기반한 방식에 비해 우수한 성능을 가진다는 것이 보여졌다^[23,24].

IV. Massive MIMO에서의 효율적 빔포머 구조 및 설계 알고리즘

앞 절에서는 FDD 시스템에서 채널 추정과 파일럿 신호 설계에 대한 연구를 단일 사용자 massive MIMO 관점에서 살펴보았다. 이제 단일 사용자 massive MIMO를 넘어 다중 사용자 massive MIMO 시스템을 살펴보자.

1. 두 단계 빔포머

여러 사용자를 동시에 고려하는 다중 사용자 massive MIMO 시스템의 경우 첫 번째로 부상하는 문제는 ‘massive한 기지국 안테나를 가지고 어떻게 셀 내 여러 명의 사용자를 동시에 서비스할 수 있는 빔포

머를 효율적으로 설계하는가’라는 문제이다. ‘모든 사용자의 채널 벡터 요소가 독립 균등 분포를 따라서 massive MIMO의 경우 간단한 정합 빔포밍으로만으로도 사용자간 직교성을 유지할 수 있다’라는 것은 단지 간단히 massive MIMO 시스템 성능을 해석하고자하는 이상적 가정에 불과하다. 실제 수십 내지 수백의 안테나 요소들의 채널 요소가 모두 독립적일 수 없다. 이에 채널 추정과 실질적 빔포머 설계의 복잡도를 줄이는 것이 massive MIMO에서는 매우 중요한데, 이 두 가지를 동시에 해결하는 방법 중 하나로 최근 각 사용자의 채널 공분산 행렬을 이용하여 외부 (outer) 빔포머를 설계하고 외부 빔포머와 실제 채널의 곱을 Effective 채널로 간주하고 이

Effective 채널의 채널 상태 정보 (effective CSI)를 피드백 받아, 이를 이용하여 내부 (inner) 빔포머를 설계하는 두 단계 빔포머 방식이 Joint Spatial Division and Multiplexing (JSDM) 이라는 이름으로 제안되었다^[25-27]. 이 두 단계 빔포밍 방식은 크게 보면 divide-and-conquer 방식으로 외부 빔포머에서는 여러 사용자들을 비슷한 채널 공분산 행렬을 가지는 사용자 그룹으로 최대한 분리하고, 내부 빔포머에서는 추가적으로 같은 사용자 그룹 내에서 각각의 사용자를 구분하는 방식이다.

좀 더 구체적으로 설명하면, 각 사용자의 채널이 one-ring 모델⁴⁾을 따른다고 가정할 때, 기지국과 사용자 간의 AoA와 angular spread에 의해 결정되는 채널 공분산 행렬이 서로 겹치지 않는 angular support를 가지고 있으면, 기지국의 안테나 수가 많아짐에 따라 채널 공분산 행렬의 열공간 (column space)이 서로 직교함을 보였다^[25]. 그리하여, 이 같은 사실을 기반으로 Ahikary 등은 다음과 같은 두 단계 빔포머에 적합한 새로운 방식 JSDM을 제안하였다. 같은 그룹 내에 속하는 사용자들끼

리는 비슷한 채널 공분산 행렬을 갖고 서로 다른 그룹에 속하는 사용자 간에는 공분산 행렬의 열공간이 거의 직교하는 성질을 갖도록 여러 개의 그룹으로 나눈 뒤 (virtual sectorization), 기존의 MIMO 빔포머를 외부와 내부 빔포머 두 단

계로 쪼개서 사용자들에게 정보를 전송한다. 여기서 외부 빔포머는 채널 공분산 행렬에 의해서만 설계한다. 그렇다면, 내부 빔포머에게는 실제 채널과 외부 빔포머가 곱해진 것이 채널로 보이는데 이 내부 빔포머에게 보이는 Effective 채널의 차원은 원래 채널의 차원인 N_r 보다 훨씬 줄어들게 된다. 내부 빔포머는 이 Effective 채널의 상태정보만을 피드백 받아, 이 정보를 이용하여 설계된 ZF 또는 MMSE와 같은 빔포머로 같은 그룹내 사용자들을 구

다중 사용자 massive MIMO 시스템의 경우 첫 번째로 부상하는 문제는 ‘massive한 기지국 안테나를 가지고 어떻게 셀 내 여러 명의 사용자를 동시에 서비스할 수 있는 빔포머를 효율적으로 설계하는가’라는 문제이다.

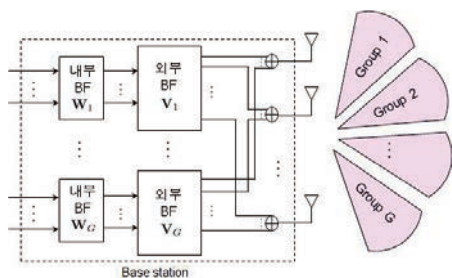
4) 기지국이 산 위나 빌딩 꼭대기 같은 높은 위치에 배치되어 주변에 산란체가 없어 모든 각도의 시야 (line of sight; LoS)가 확보되는 반면 사용자 부근에는 산란체들이 많아 전 방향으로 균등하게 전파경로가 생성되는 상황을 가정하는 채널 모델이다.

분한다^[25]. 여기서, 복잡도 감소와 실제 상태를 추정해야 하는 채널 차원의 축소의 핵심은 외부 빔포머를 채널의 통계정보 즉 채널의 공분산 행렬로만 설계하는 것이다.

JSDM을 물리적인 측면을 곁들여서 설명하면, 기지국이 미리 여러 개의 겹치지 않는 AoA 구간을 정하여 그룹을 나눈 뒤, 각 사용자를 자신의 angular support에 해당하는 각도 구간의 그룹으로 할당하여서 virtual sectorization을 한 뒤, 두 단계 빔포머를 사용하는 방법이라 할 수 있다. 하지만, 실제로는 각 사용자의 angular support가 매우 다양하게 존재하여서 모든 사용자들을 angular support가 서로 겹치지 않는 몇 개의 그룹으로 나누는 것이 사실상 불가능하다. 그리하여, 몇 가지 그룹핑 방법^[26]과 사용자 스케줄링 방법^[26,28,29]이 제안되었지만, 그럼에도 불구하고, 그룹 간 채널 공분산 행렬이 서로 직교하지 않아서 그룹 간 간섭이 생기게 된다. 따라서, 두 단계 빔포밍에서는 그룹 간 간섭을 효과적으로 제어하고 자신의 그룹의 전송 파워를 강화시킬 수 있는 외부 빔포머를 잘 설계하는 것이 필수적이다

[30-32]

지금까지 연구된 채널 공분산 행렬을 이용한 외부 빔포머 설계 방법을 살펴보면 주로 내부 빔포머가 Effective 채널을 이용하여 ZF 방식으로 설계된다는 가정하에 연구가 진행되었다 (하지만 MMSE 방식을 사용하여도 무관하다)^[30-32]. 먼저 [26]에서는 각 그룹별로 자신의 그룹의 채널 공분산 행렬의 주(dominant) 고유벡터들을 다른 그룹의 채널 공분산 행렬들의 주 고유벡터들의 영공간 (null



〈그림 2〉 다중 그룹 다중 사용자 MIMO 하향 링크를 위한 두 단계 빔포머 구조

space)으로 투영 (projection)시킨 뒤 나온 벡터들을 모아서 외부 빔포머로 설계하였다. 하지만, 이 방법은 각 채널 공분산 행렬의 주 고유벡터들만을 고려하기 때문에 비교적 간단하지만 성능 열화가 있다^[32]. [30]에서는 특별한 최적성 (optimality)없이 발견론적 (heuristic) 접근방법으로 그룹 간 간섭 빼기 가중된 (weighted) 자신의 그룹 신호를 최소화하는 외부 빔포머를 설계하였다. 이 경우에는, 각 그룹별로 다른 그룹의 채널 공분산 행렬의 합 행렬에서 가중된 자신의 그룹의 채널 공분산 행렬을 빼서 나온 행렬의 열세한 고유 벡터들을 모아 외부 빔포머가 설계된다. [31]에서는 외부 빔포머를 형평성 (fairness) 관점에서 설계하였다. 이 연구에서는, 모든 사용자 가운데 가장 작은 데이터 율 값을 최대화하는 DFT (discrete Fourier transform) 행렬의 열들을 선택하여 외부 빔포머를 설계하였다. [30,31]과 같이 SINR을 직접적으로 최적화하는 것이 아니라 변형된 식을 최적화하는 외부 빔포머를 설계하는 이유는 SINR의 분자에는 자신의 그룹을 위한 외부 빔포머가 분모에는 다른 그룹을 위한 외부 빔포머가 꼬여 있어서 최적화하기가 매우 어렵기 때문이다.

이 SLNR 기반의 제안된 외부 빔포머는 합 율 (sum rate)측면에서 현재까지 제안된 두 단계 빔포밍을 위한 채널 공분산 행렬을 이용한 외부 빔포머 설계 방식 가운데 가장 좋은 성능을 낸다^[32]

이러한 SINR 접근 방식의 어려움을 극복하기 위해 [32]에서는 신호대누설더하기잡음비 (signal-to-leakage-plus

noise ratio; SLNR)를 기준으로 외부 빔포머를 설계하는 방식을 채택하였다. 다중 사용자 MIMO 브로드캐스트 (broadcast; BC) 채널 상황에서 처음으로 Sadek 등에 의해 제안된 SLNR 방식^[33]은 자신의 신호 크기와 다른 사용자에게 미치는 간섭량 더하기 잡음의 비를 최대화하는 빔포머를 설계하는 방식으로써, 자신의 빔포머의 함수로만 식이 표현되기 때문에 닫힌 꼴로 구할 수 있다⁵⁾. 하지만, 두 단계 빔포머 구조에서는 내부 빔포머와 외부 빔포머가 서로 꼬여있어서 SLNR를 최대화하는 것조차 쉽지가 않다. 따라서, [32]에서는 내부 빔

5) SLNR 방식은 처음에는 발견론적으로 제안되었지만 나중에 MISO 간섭 채널에서 파레토 최적점에 도달하는 방식이라는 것이 밝혀졌다^[34,35].



포머를 ZF 빔포머를 사용한다고 두고 평균 SLNR의 하계를 이끌어내어 이것을 최대화하여 외부 빔포머를 설계하였다. 이 때 평균 SLNR의 하계를 최대화하는 문제를 trace quotient (TQ) 문제로 바꾸어 이 문제를 푸는 알고리즘을 새로 제안하였다. 이 SLNR 기반의 제안된 외부 빔포머는 합 율 (sum rate) 측면에서 현재까지 제안된 두 단계 빔포밍을 위한 채널 공분산 행렬을 이용한 외부 빔포머 설계 방식 가운데 가장 좋은 성능을 낸다^[32].

2. 밀리미터파 대역 – 하이브리드 빔포머

각 안테나 성분 별로 RF 체인을 연결하여 구동되는 기존의 full 디지털 빔포머 방식은 작은 부피에 많은 수의 안테나를 집적하여 사용하는 밀리미터파 통신에서 하드웨어 제약으로 인해 구현되기 어려운 면이 있다^[36,37]. 따라서, 안테나의 수 N_t 보다 적은 수 $N_{RF}(N_t \geq N_{RF})$ 만큼의 RF 체인을 이용하여 DAC (digital-to-analog converter)를 거치기 전에 기저대역 (baseband)에서 프로세싱을 하는 디지털 빔포머와 DAC를 거친 후에 RF 대역에서 프로세싱을 하는 아날로그 빔포머를 동시에 설계하는 하이브리드 빔포머 구조가 제안되었다⁶⁾. 신호의 위상과 진폭을 자유롭게 제어할 수 있는 디지털 빔포머와는 달리 아날로그 빔포머에서는 하드웨어 제약조건으로 인해 위상 천이기 (phase shifter)만을 고려하여서 모든 성분들의 진폭은 일정한 크기를 갖고 위상만 제어할 수 있는 경우가 많다. 따라서, 가장 단순한 단일 사용자 MIMO 시스템 상황에서조차 기존의 full 디지털 빔포머를 설계하는 것과 다르게 하이브리드 빔포머를 설계하는 것은 단순한 문제가 아니다.

이와 같은 단일 사용자 MIMO 시스템에서 밀리미터파 대역의 희박한 경로의 채널 특성을 이용하여 용량 최대화 문제를 basis pursuit 문제로 근사화한 뒤 orthogonal matching pursuit (OMP)를 이용해 저 복잡도의 하이브리드 빔포머 설계 방법이 제안되었다^[38]. 이 방법에서는 채널 정보를 송수신기에서 정확히 알고 있다는 가정 하에

제안되었지만 하이브리드 빔포머 구조에서는 RF 체인의 수가 적어서 안테나 성분 별로 완벽한 채널 정보를 얻기가 매우 어려워 채널 추정과 하이브리드 빔포머를 동시에 고려하여 설계하는 방법이 연구되고 있다^[17,18]. 또한 좀더 실질적인 상황을 고려하여 위상의 양자화 오차를 고려한 아날로그 빔포머 설계 방법도 연구되었고^[39], 각 RF 체인 별로 임의의 k 개의 안테나와 연결되어 아날로그 빔포머를 설계하는 방법도 연구되었다^[40].⁷⁾ 최근에는 단일 사용자 MIMO에서 더 나아가 다중 사용자 MIMO 시스템에서 하이브리드 빔포머 설계 방법이 연구되고 있다^[41]. [41]에서는 각 사용자의 채널의 가장 우세한 고유벡터 방향(여러 AoA(AoD) 중 가장 큰 신호의 방향)을 모아서 아날로그 빔포머를 설계하고 디지털 빔포머로 ZF 빔포머를 사용하여 사용자간 간섭을 없애는 방식으로 하이브리드 빔포머를 설계하였다.

하지만, 하이브리드 빔포머의 가장 큰 문제는 OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing)과 같은 광대역 기반의 시스템에서 아날로그 빔포머를 어떻게 설계해야 하는지에 대한 것이다. 앞서 기술한 협대역 (narrow-band)을 가정한 연구와 달리 하이브리드 OFDM 시스템에서는 각 부반송파 (sub-carrier) 채널마다 동일한 아날로그 빔포머를 설계해야 하기 때문에 완전히 다른 방식의 설계법이 필요하다^[42]. OFDM을 위한 최적 하이브리드 빔포머 설계는 밀리미터파 massive MIMO의 효율적 구현을 위해 꼭 해결해야 할 중요한 이슈로써 간주되어지며, 최근 들어 그 중요성이 인식되어 greedy 방식과 스케줄링을 방법을 기반으로 한 연구가 진행되고 있다^[43,44].

V. Massive MIMO에서의 효율적 사용자 스케줄링

Massive MIMO 시스템은 근본적으로 안테나를 기반으로 만들어진 공간 차원을 이용해 다수의 사용자를 동시

6) 하이브리드 빔포머 설계는 두 단계 빔포머 설계 방식과 매우 유사한데, 외부 빔포머가 RF 대역에서 설계되어지면 일종의 하이브리드 빔포머로 간주할 수 있다.

7) [40]에서 제안한 방법은 $k=1$ 일 때는 기존의 안테나 선택 기법 (antenna selection)이 되고 $k=N_t$ 일 때는 기존의 full 디지털 빔포머를 포함하는 아주 일반적인 아날로그 빔포머 구조이다.



에 서비스하는 시스템이다. 그러므로, 기존 multi-user MIMO에서처럼 셀 내 많은 사용자로부터 서비스할 사용자들을 선택해야 하는 사용자 스케줄링 문제를 또다시 고려해야 한다. 다수의 사용자 가운데 좋은 채널 품질을 갖는 사용자를 선택하여 다중 사용자 다이버시티 (multi user diversity) 이득을 얻는 방법인 스케줄링 기법은 특히 하향링크 상황 하에서 지난 10년간 여러 가지 측면에서 많은 연구가 진행되었다. 많은 연구자들이 지금도 효율적인 스케줄링 방법에 대해 연구를 하고 있지만, 대부분 랜덤 빔포밍 (random beamforming; RBF)^[45]과 준-직교 사용자 선택 (semi-orthogonal user selection; SUS)^[46] 이 두 가지 스케줄링 방법에 기반하고 있다. 피드백 오버헤드 측면에서 양 극에서 있는 이 두 가지 스케줄링 방법은 모두 사용자의 수가 무한히 많아짐에 따라 점근적으로 최적임이 알려져 있다. 하지만, 사용자의 수가 유한한 실제 시나리오의 경우에는 RBF가 SUS보다 성능 열화가 심하다는 것이 알려져 있고, 반면에 SUS의 경우에는 모든 사용자의 채널 정보를 피드백 받아 사용자를 선택하기 때문에 피드백 오버헤드가 너무 크다는 것이 알려져 있다^[46]. 따라서, 다중 사용자 MIMO 시스템에서는 성능과 피드백 오버헤드의 trade-off 관계를 고려하여 적절한 스케줄링 방법을 사용해야 한다.

Massive MIMO에서는 다수의 안테나 요소로 인해 더욱더 피드백 오버헤드가 증가하게 된다. 다행스럽게도 rich scattering 환경 하에 massive MIMO 시스템에서는 스케줄링 이득이 아주 미미하다는 것이 알려져 있어^[26,47,48], 따로 RBF와 SUS와 같은 스마트한 스케줄링 방법을 이용하지 않고 확률적으로 사용자를 랜덤하게 선택하는 방법이 제안되었다^[26,48]. 이 방법은 채널 정보 피드백 없이 사용자를 스케줄링을 하기 때문에, 상당한 양의 피드백 오버헤드를 줄일 수 있어 massive MIMO에서 유용하다. 그러나, 앞 절에서 설명한 massive MIMO를 효율적으로 구현할 수 있는 두 단계 JSDM 구조에서는 상황이 달라진다. JSDM에서는 각 그룹 당 실질적인 채널의 차원의 수는 기존 MIMO처럼 작을 수 있기 때문에 스

케줄링 이득을 얻기 위해 스마트하게 스케줄링 방법을 고안하는 것이 중요하다.

1. 레퍼런스 빔 기반 분산적 직교 선택 방법

[26]에서 두 단계 하향 빔포밍 JSDM을 위해 기존 RBF 기반의 스케줄링 방식이 제안되었다. 하지만, 최근에 [28,29]에서는 JSDM 구조에서 피드백 측면에서 매우 간단하면서도 우수한 성능을 갖는 획기적인 스케줄링 방법이 제안되었다. 이 방법은 RBF가 SUS보다 성능 열화가 생기는 요소들을 먼저 분석하여 찾아낸 뒤, 이 요소들을 RBF의 피드백 오버헤드 양을 유지시키는 조건 내에서 적절하게 개선하여 SUS의 장점을 유지하고 RBF의 단점을 극복하였다. RBF가 성능 열화가 생기는 주요 원인은 1) 각 직교 빔의 SINR을 기준으로 사용자를 선택하는 것과 2) 사용자 선택 이후에 빔 보정 (beam refinement)이 전혀 없이 하향 정보 전송이 이루어지는 것이다. 따라서,

rich scattering 환경 하에 massive MIMO 시스템에서는 스케줄링 이득이 아주 미미하다는 것이 알려져 있어^[26,47,48]

[28,29]에서는 이 요소들을 개선하여 다음과 같은 사용자 스케줄링 방법 ReDOS (REference-based Distributed (semi-)Orthogonal user Selection)를 제안하였다. (이해를 쉽게 하기 위하여 JSDM

구조에서 한 개의 그룹만 존재하는 환경으로 가정하고 ReDOS 스케줄링 방법을 기술하겠다.)

1. 기지국은 트레이닝 시간 동안 서로 직교하는 레퍼런스 빔들을 순차적으로 전송한다. 이때 <그림 3>과 같이 각 레퍼런스 빔 둘레에 특정 각도의 고깔 (cone)을 정의한다. 각 레퍼런스 빔에 할당된 고깔은 서로 교집합이 없도록 한다.
2. 트레이닝 시간 동안 각 사용자는 자신의 채널 벡터가 포함된 고깔이 있는지 체크한다. (고깔에 포함되었는지는 기준 빔과 자신의 채널 벡터의 각도만으로 알 수 있다. 한 채널 벡터는 두 개 이상의 고깔에 포함될 수 없다.) 자신의 채널 벡터가 포함된 고깔이 있으면, 사용자는 이에 해당하는 레퍼런스 빔 인덱스와 자신의 채널 벡터의 크기를 기지국에 전송한다.
3. 2에서 사용자로부터 받은 정보를 이용하여, 기지국



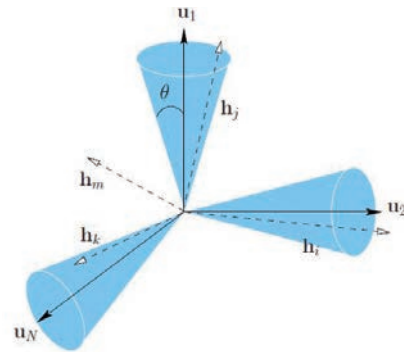
은 각 직교 레퍼런스 빔마다 그 빔의 고깔에 자신이 포함되었다고 선언한 사용자들을 모아 놓고 채널의 크기가 가장 큰 사용자를 그 직교 빔에 할당하고, 이렇게 사용자를 선택한 뒤 선택된 사용자들에게 자신이 스케줄링이 되었다고 paging 신호를 전송한다.

4. Paging 신호를 받은 사용자는 이제 자신의 채널 벡터를 기지국에게 전송한다.
5. 기지국은 전송받은 채널벡터 정보를 이용하여 최종적으로 ZF 빔포밍으로 빔을 형성한 후 스케줄링된 사용자에게 정보를 전송한다.

이 ReDOS 방법⁸⁾은 레퍼런스 빔을 보내서 사용자를 선택하는 구간(1-3)과 선택된 사용자에게서만 채널 정보를 피드백 받아서 ZF 빔포밍으로 레퍼런스 빔을 보정하는 구간(4-5) 두 가지 단계로 이루어져 있다⁹⁾. 앞에서 보듯이 사용자를 선택하는 첫 단계에서는 사용자들은 정수인 인덱스와 자신의 채널 벡터 크기, 즉 실수 하나만 피드백하면 된다. 그리고, 추가적으로 피드백하는 채널 벡터 자체는 선택된 사용자들로부터만 받으므로, 두 번째 단계가 시스템 전체의 피드백 양을 크게 증가시키지 않는다. ReDOS는 크게 RBF의 두 가지 측면을 개선하였는데, 첫째는 사용자를 기존 RBF처럼 각 레퍼런스 빔의 SINR값을 기준으로 선택하는 것이 아니라 레퍼런스 빔에 형성된 고깔과 사용자 채널의 크기로 사용자를 선택하는 것과, 둘째로는 선택된 사용자의 채널 벡터 정보를 추가로 획득하여 레퍼런스 빔을 ZF 빔으로 보정하여 정보를 전송하는 것이다. RBF는 레퍼런스 빔을 바꾸지 않고 그대로 데이터 전송 빔으로 사용할 것이라는 가정을 가지고 있기 때문에 레퍼런스 빔 기준 SINR이 최

최근에 [28,29]에서는 JSDM 구조에서 피드백 측면에서 매우 간단하면서도 우수한 성능을 갖는 획기적인 스케줄링 방법 ReDOS가 제안되었다.

8) 여러 그룹이 있는 JSDM 구조에서는 기지국이 각 그룹 별로 채널 공분산 행렬의 우세한 고유벡터 방향으로 순차적으로 빔을 전송하고 각 사용자가 그룹 간 간섭을 고려한 유사-SINR 값을 기준으로 피드백 하는 것을 제외하고, 위에 기술한 방법과 동일하다^[28].
 9) 이렇게 첫 번째 단계에서 사용자를 선택하고 두 번째 단계에서 선택된 사용자를 위한 빔포머를 설계하는 두 단계 스케줄링 방식은 기존 다중 사용자 MIMO BC에서 지속적으로 연구되어왔다^[49-51]. 하지만, 그 어느 것도 ReDOS만큼의 성능을 내지 못한다.



〈그림 3〉 기준 직교빔을 중심으로 형성된 고깔들

대가 되는 사용자를 뽑지만, ReDOS는 레퍼런스 빔을 사용하는 것까지는 RBF와 같지만, 두 번째 단계에서 뽑혀진 사용자 채널에 적합한 ZF 빔을 사용한다고 가정하므로, 첫 번째 사용자 선택 단계에서는 서로 거의 직교하면서 채널벡터의 길이가 가장 긴 사용자를 뽑는 것이다. 여기서, 뽑혀진 사용자 채널간의 준직교성은 바로 직교 기준빔을 중심으로 형성된 고깔이 책임지는 것이다. 어느

정도 직교성을 보장한 다음에 채널 벡터의 크기가 큰 사용자를 선택하고 최종적으로 ZF 빔을 형성하여 데이터를 전송하는 SUS의 철학을 그대로 이용하는 것이다. 다만, 모든 사용자가 채널벡터를 기지국에

피드백하여 모든 것이 기지국에서 이루어지는 SUS에 반해 이 ReDOS 방법은 SUS의 철학을 분산적으로 구현한 것이다. ReDOS가 RBF의 피드백 양과 거의 비슷한 피드백 양을 가지면서 동시에 SUS의 성능과 견줄만한 성능을 가짐을 시뮬레이션을 통해 보였다^[28]. 또한, RBF와 SUS와 마찬가지로 사용자 수가 무한히 많아짐에 따라 점근적으로 최적임이 증명되었고^[28], JSDM 구조에서도 점근적 최적성이 증명되었다^[28]. RBF와 SUS의 장점을 적절하게 이용하여 Trade-off 관계에 있는 피드백 양과 성능 두 가지 요소를 동시에 향상시킨 ReDOS 방식은 massive MIMO에서 주목할 만한 사용자 스케줄링 방법으로 간주되고 있으며 이를 기반으로 한 새로운 연구가 추가적으로 진행되고 있다^[52].



2. 밀리미터파 대역 – 랜덤 빔포밍

앞에서 설명한 스케줄링 방법 (RBF, SUS, ReDOS)을 포함한 지금까지 대부분의 스케줄링 방법은 각 사용자 k 의 채널이 $CN(0, R_k)^{10}$ 를 따르는 rich scattering 채널 환경에서 연구가 진행되었다^[53-56]. 하지만, 밀리미터파 환경에서는 채널 전파 손실을 극복하기 위한 방향성 빔포밍을 위한 다수의 안테나를 사용하는 시스템 특징과 전파 경로의 수가 희박한 채널 특성으로 인해 기존의 rich scattering 채널 환경을 기반으로 한 다중 사용자 스케줄링 이득에 관한 분석들을 단순히 확장 및 적용할 수가 없다. 특히 임의의 전파이득을 갖는 희박한 수의 전파경로가 다양한 각도에서 형성되는 밀리미터파 채널 특성은 성능 분석을 더욱더 어렵게 만든다. 그리하여, 밀리미터파 massive MIMO 시스템에서의 다중 사용자 스케줄링의 성능을 분석하기 위해 밀리미터파 채널 특성을 적절하게 반영하면서도 성능 분석을 용이하게 하는 아래와 같은 균등 랜덤 단일 경로 (uniform random single path; UR-SP) 채널 모델이 제안되었다^[57-61].

$$h_k = \alpha_k \sqrt{N_t} a_{TX}(\theta_k), \quad k = 1, \dots, K$$

여기서, h_k 는 사용자 k 의 채널이고, $\alpha_k \sim CN(0, 1)$ 은 경로 이득, $\theta_k \sim U[-1/2, 1/2]$ 은 AoD 각도이다. 이 채널 모델은 기지국과 사용자 간 채널이 한 개의 경로를 가지고 이 경로는 임의의 랜덤한 각도와 이득을 갖는 모델로서, 존재할 수 있는 여러 개의 경로들 중 우세한 경로 한 개만을 고려하는 모델이다^[11].

최근 [60]에서는 밀리미터파 massive MIMO에서의 채널 환경을 잘 모델하는 이 UR-SP 채널 모델 하에서 RBF 스케줄링 방식의 성능을 분석하였는데, UR-SP 채널 모델 하에서 RBF의 성능은 기존의 저주파 대역의 rich scattering 채널 모델하에서의 RBF 성능과는 완전

히 다르다는 것이 밝혀졌다. 먼저 [60]의 시스템 모델을 살펴보면 전체 네트워크가 Uniform Linear Array(ULA) 구조로 N_t 개의 안테나를 가지는 기지국과 단일 안테나를 갖는 K 명의 사용자로 구성되어진 상황을 고려한다. 이때, 밀리미터파 통신의 핵심적인 특징인 다수의 안테나를 사용하는 것과 희박한 속성의 채널을 고려하기 위해 기지국의 안테나의 수 N_t 가 많아지는 상황, 즉 N_t 의 점근적 상황 (asymptote)을 고려하고, 앞서 설명한 UR-SP 채널 모델을 고려한다. 이러한 상황에서 [60]에서는 RBF 스케줄링에 관한 여러 가지 새로운 결과들을 밝혀내었다. 그 가운데 주요 결과 하나를 소개하면 다음과 같다.

UR-SP 채널 모델 하에서 RBF의 성능은 기존의 저주파 대역의 rich scattering 채널 모델 하에서의 RBF 성능과는 완전히 다르다는 것이 밝혀졌다.

정리 1: [60] (각 사용자가 UR-SP 채널 모델을 따를 때)

$$\frac{R_{\text{RBF}}}{N_t} \rightarrow \begin{cases} c_1, & \text{as } N_t, K \rightarrow \infty, \text{ for } K = \Omega(N_t) \\ 0, & \text{as } N_t, K \rightarrow \infty, \text{ for } K = o(N_t) \end{cases}$$

여기서, R_{RBF} 는 RBF의 합 전송율을 나타내고, $c_1 > 0$ 이고 Ω 와 o 는 각각 big-omega와 little-o 함수를 나타낸다.

따름 정리 1: [60] $K = \Omega(N_t)$ 일 때는 $R_{\text{RBF}} \sim R_{\text{opt}}$ 이다. 여기서 R_{opt} 는 최적 성능이고 $x \sim y$ 는 $\lim_{N_t, K \rightarrow \infty} x/y = 1$ 을 의미한다.

즉, 사용자의 수가 안테나의 수의 선형보다 빠르게 증가하면 RBF가 선형 합 전송율 스케일링 (linear sum rate scaling)을^[12] 달성하고, 더 나아가 최적 합 전송율 성능을 낸다. 정리 1과 따름 정리 1은 다수의 안테나를 사용하는 밀리미터파 대역 통신에서 스케줄링의 매우 긍정적인 측면을 밝혔는데 이것은 기존의 rich scattering 환경에서 RBF의 결과를 비교해보면 더욱더 명확해진다.

정리 2: [45] 각 사용자가 Rayleigh fading 채널 모델을 따를 때, 즉, $h_k \sim CN(0, I)$ 일 때

10) 일반적인 correlated 채널 모델은 $R_k = R, \forall k$ 으로 표현 가능하다.

11) 단일 경로 채널 모델은 LoS가 존재하는 환경은 LoS만을 고려하고, Non-LoS (NLoS)들만 존재하는 환경은 가장 크기가 큰 NLoS 한 성분을 고려하는 모델이라고 생각할 수 있다.

12) 선형 합 전송율 스케일링은 $R = \Theta(N)$ 를 의미한다. Θ 는 big-theta 함수이다.

$$\frac{R_{\text{RBF}}}{N_t} \rightarrow \begin{cases} c_2, \text{ as } N_t, K \rightarrow \infty, \text{ for } K = \Omega(\exp(c_3 N_t)) \\ 0, \text{ as } N_t, K \rightarrow \infty, \text{ for } K = o(\exp(c_3 N_t)) \end{cases}$$

여기서, $c_2, c_3 > 0$ 이다.

정리 2에 의하면 rich scattering 환경 즉, 각 사용자가 Rayleigh fading 채널 모델을 따르는 경우 RBF의 성능이 사용자의 수가 안테나의 수의 지수 승보다 빠르게 증가할 때 안테나 수에 선형으로 증가하는 합 전송율 스케일링을 달성하고, 그보다 느리게 증가할 때에는 안테나 수에 선형으로 증가하는 합 전송율을 달성하지 못한다. 바꿔 말하면, rich scattering 환경에서의 RBF는 사용자의 수가 안테나의 수에 비하여 엄청나게 많은 상황에서만 적절한 성능을 낼 수 있음을 의미하며, massive MIMO와 같이 매우 많은 안테나를 사용하는 시스템에서는 현실적인 사용자의 수의 한계로 인해 RBF가 좋은 성능을 내기가 어려움을 말해준다. 이는 기존에 알려진 SUS와 같은 다른 스마트한 스케줄링 방법의 스케줄링 이득도 안테나 수가 매우 많은 massive MIMO 시스템 상황에서 매우 미미하다는

UR-SP 채널 모델 환경에서 RBF는 사용자의 수가 안테나 수의 선형만큼 빠르게 증가하여도 안테나의 수에 선형적으로 증가하는 합 전송율 스케일링을 달성할 뿐만 아니라 최적 성능을 달성

[26,47,48] 결과와도 동일선상에 있는 결과이다.

하지만, 정리 1과 따름 정리 1에서 보듯이, 밀리미터파 전파 특성인 경로 희박성과 직진성을 모델하는 UR-SP 채널 모델 환경에서의 결과는 이와 완전히 다르다¹³⁾. 이때는, RBF의 성능이 사용자의 수가 안테나 수의 선형만큼 빠르게 증가하여도 안테나의 수에 선형적으로 증가하는 합 전송율 스케일링을 달성할 뿐만 아니라 최적 성능을 달성하게 되어, 많은 수의 안테나를 사용하는 밀리미터파 시스템에서 현실적인 사용자의 수를 고려하여도 RBF가 유용하게 쓰일 수 있음을 시사한다.

[62,63]에서는 UR-SP 채널 모델에서 더 나아가 균등 랜덤 다중 경로 (uniform random multi-path; UR-MP) 채널 모델을 제안하고 [60]의 결과를 확장하였다. 먼저 [62,63]에서 정의한 UR-MP 채널 모델을 설명하면

다음과 같다.

$$h_k = \sqrt{\frac{N_t}{L}} \sum_{i=1}^L \alpha_{k,i} a_{\text{TX}}(\theta_{k,i}), \quad k=1, \dots, K$$

여기서, L 은 다중 경로의 수이고, $\alpha_{k,i} \sim \text{CN}(0,1)$ 이고 $\theta_{k,i} \sim \mathcal{U}[-1/2, 1/2]$ 이다. 이 UR-MP 채널 모델은 파라미터에 따라 기존의 채널 모델들로 귀결되기도 한다. 이를 살펴보기 위해서 [62,63]에서는 $L=(N_t)^\beta$ 로 두고 단일 파라미터의 값에 따라 채널이 어떻게 변화하는지 분석하였다. 먼저 $\beta=0$ 인 경우에는, $L=1$ 이 되어 UR-SP 채널 모델이 되는 것을 쉽게 알 수 있고, $\beta>1$ 인 경우에는 N_t (와 L)가 무한히 증가함에 따라 기존 Rayleigh fading 채널 모델로 수렴하게 된다^[63]. 또한, $0<\beta<1$ 인 경우에는 UR-SP 채널 모델도 아니고 Rayleigh fading 채널도 아닌

희박한 속성을 갖는 위 두 채널 모델의 중간에 있는 다중 경로 채널 모델임을 알 수 있다. 즉, UR-MP 채널 모델은 UR-SP 채널 모델과 Rayleigh fading 채널 모델 두 양극의 채널 모델을 L 이라는 파라미터로 연결해주는 일반적인 채널 모델이다.

따라서, 실제 밀리미터파 채널의 희박하지만 다중 경로를 가지고 있는 성질을 L 을 표현함으로써 밀리미터파 채널을 더욱 정확하게 모델할 수 있다.

[63]는 이 UR-MP 채널 모델에서 여러 L 값에 따라 (N_t 의 함수로 표현) RBF의 안테나 수에 선형으로 증가하는 합 전송율 스케일링을 달성하기 위해 필요한 셀 내 사용자 수를 안테나 수의 함수로 도출하였고, 이 결과는 <표 1>과 같다. <표 1>에서 보이듯이, L 이 고정되어 있을 때는 UR-SP 채널 모델에서처럼 사용자의 수가 N_t 에 선형적으로 증가하면 N_t 에 선형인 합 전송율 스케일링을 달성할 수 있고, $L=\log(N_t)$ 로 증가하는 경우에는 N_t 의



<그림 4> β 에 따른 UR-MP 채널 모델

13) 상반된 결과가 나오는 근본적인 이유는 단일 경로 채널 모델의 자유도 (degree-of-freedom)가 안테나의 수의 관계없이 1이기 때문이다^[60].



〈표 1〉 다중 경로의 수에 따른 안테나 수에 선형 증가하는 합 전송을 스케일링에 필요한 사용자 수^[63]

채널 다중 경로수	선형 합전송에 필요한 사용자수
L fixed	$K \sim N_t$ (linear)
$L = \log(N)$	$K \sim N_t^{1+c}$ (polynomial)
$L = (N)^\beta, 0 < \beta < 1$	$K \sim e^{c \cdot N^\beta}$ (sub-exponential)
$L = N_t$ or faster	$K \sim e^{c \cdot N}$ (exponential)

polynomial, $L=N_t^\beta(0<\beta<1)$ 로 증가하는 경우에는 N_t 의 sub-exponential, $L=N_t$ 이거나 더 빠르게 증가하는 경우에는 N_t 의 exponential로 증가하는 사용자의 수가 N_t 에 선형인 합 전송을 스케일링을 달성하기 위해 필요하다. 이는 앞서 설명한 [45]과 [60]의 결과를 포함하는 결과로써 밀리미터파 시스템에서 스케줄링 이득에 관한 많은 정보를 제공해준다.

셀 안에 사용자의 수가 〈표 1〉에서 기술된 것처럼 충분히 존재하는 경우에는 RBF만을 사용하여도 좋은 성능을 얻을 수 있지만, 사용자 수가 충분하지 않은 sparse user regime 경우¹⁴⁾에는 성능열화가 있는 부분 채널정보 (partial CSI) 기반의 RBF보다 더 효율적인 스케줄링 방법이 필요하다. 이를 위해 [63]에서는 사용자가 충분치 않은 sparse user regime에서 beam aggregation 방식의 새로운 사용자 스케줄링 방법을 제안하였다. 이 방식은 UR-MP 채널에서 RBF와 견줄만한 정도의 피드백 양을 유지하면서 동시에 기존의 sparse user regime에서 제안된 스케줄링 방법과 RBF의 성능보다 월등한 성능을 내어 밀리미터파 환경에서 효율적인 스케줄링 방법으로 주목을 받을 것으로 예상된다.

VI. 결론

본 소개 글에서는 5G 이동 통신 시스템을 위한 핵심 요소 기술인 massive MIMO 실현을 위한 전반적인 연구 동향에 대해서 살펴보았다. 앞서 말한 것과 같이 많은 수의 안테나를 사용함으로써 생겨나는 막대한 양의 채널 추정 오버헤드를 극복하기 위한 파일럿 신호 설계, 채널 추

14) Rich scattering 환경에서 사용자 수가 적은 sparse user regime을 고려한 스케줄링 방법이 기존에 연구되어왔다^[50,64]

정, 효율적인 빔포머 설계, 새로운 스케줄링 방법 개발 등과 같이 여러 측면에서 massive MIMO 기술을 실현하려는 노력이 진행되고 있다. 아직까지도 massive MIMO와 관련된 많은 중요한 문제들이 풀리지 않은 채 남겨져 있으며 2020년 상용화를 목표로 하는 5G 시스템 구현이 성공적으로 마무리되기 위해서는 이와 같은 많은 현실적인 문제들이 꼭 해결되어야 한다.

참고 문헌

- [1] METIS Deliverable D1.1. "Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system," EU-FP7 Project METIS (ICT-317669) Deliverable 1.1, Apr. 2013.
- [2] F. Rusek et al., "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," IEEE Signal Process. Mag., vol. 30, no. 1, pp. 40-46, Jan. 2013.
- [3] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems," IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449, Apr. 2013.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] R. Muller, M. Vehkaperä, and L. Cottatellucci, "Blind pilot decontamination," in Proc. Int. ITG Workshop Smart Antennas, Mar. 2013.
- [8] J. Sohn, S. Yoon, and J. Moon, "When pilots should not be reused across interfering cells in massive MIMO," Proc. IEE ICC Workshop, Jun. 2015.
- [9] J. Guey and L. D. Larsson, "Modeling and evaluation of MIMO

- systems exploiting channel reciprocity in TDD mode,” in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., Sep. 2004.
- [10] J. H. Kotecha and A. M. Sayeed, “Transmit signal design for optimal estimation of correlated MIMO channels,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no.2, pp. 546–557, Feb. 2004.
- [11] S. Noh, M. D. Zoltowski, Y. Sung, and D. J. Love, “Pilot beam pattern design for channel estimation in massive MIMO systems,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 787–801, Oct. 2014.
- [12] J. Choi, D. J. Love, and P. Bidigare, “Downlink training techniques for FDD massive MIMO systems: Open-loop and closed-loop training with memory,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 802–814, Oct. 2014.
- [13] J. So, D. Kim, Y. Lee, and Y. Sung, “Pilot signal design for massive MIMO systems: A received signal-to-noise-ratio-based approach,” *IEEE Signal Processing Letter*, vol. 22, no. 5, May. 2015.
- [14] C. Doan, S. Emami, D. Sobel, A. Noknejad, and R. Brodersen, “Design considerations for 60 GHz CMOS radios,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 12, pp. 132–140, 2004.
- [15] A. M. Sayeed, “Deconstructing multiantenna fading channels,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, pp. 2563–2579, Oct. 2002.
- [16] A. M. Sayeed and V. Raghavan, “Maximizing MIMO capacity in sparse multipath with reconfigurable antenna arrays,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 1, pp. 156–166, Jun. 2007.
- [17] A. Alkhateeb, O. E. Ayach, G. Leus, and R. W. Heath Jr., “Hybrid precoding for millimeter wave cellular systems with partial channel knowledge,” in Proc. Inf. Theory and Appl. Workshop, (San Diego, CA), 2013.
- [18] A. Alkhateeb, O. E. Ayach, G. Leus, and R. W. Heath, “Channel estimation and hybrid precoding for millimeter wave cellular systems,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 8, pp. 831–846, Oct. 2014.
- [19] W. U. Bajwa, J. Haupt, A. M. Sayeed, and R. Nowak, “Compressed channel sensing: a new approach to estimating sparse multipath channels,” *Proc. IEEE*, vol. 98, pp. 1058–1076, Jun. 2010.
- [20] G. Taubock and F. Hlawatsch, “Compressed sensing based estimation of doubly selective channels using a sparsity-optimized basis expansion,” in Proc. Eur. Signal Process. Conf., (Switzerland), Aug. 2008.
- [21] W. U. Bajwa, J. Haupt, A. M. Sayeed, and R. Nowak, “Compressed channel sensing: a new approach to estimating sparse multipath channels,” *Proc. IEEE*, vol. 98, pp. 1058–1076, Jun. 2010.
- [22] J. He, T. Kim, H. Ghauch, K. Liu, and G. Wang, “Millimeter wave MIMO channel tracking systems,” arXiv preprint arXiv:1412.4224, 2014.
- [23] J. Seo, Y. Sung, G. Lee, and D. Kim, “Pilot beam sequence design for channel estimation in millimeter-wave MIMO systems: A POMDP framework,” *Proc. IEEE SPAWC 2015* Jun. 2015.
- [24] J. Seo, Y. Sung, G. Lee, and D. Kim, “Training beam sequence design for millimeter-wave MIMO systems: A POMDP framework,” submitted to *IEEE Trans. Signal Process.*, Apr. 2015. Available at arXiv.
- [25] A. Adhikary, J. Nam, J. 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, Oct. 2013.
- [26] J. Nam, A. Adhikary, J. Ahn, and G. Caire, “Joint spatial division and multiplexing: Opportunistic beamforming, user grouping and simplified downlink scheduling,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 876–890, Mar. 2014.
- [27] A. Adhikary et al., “Joint spatial division and multiplexing for mm-wave channels,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1239–1255, Jul. 2014.
- [28] G. Lee and Y. Sung, “A new approach to user scheduling in massive multiuser MIMO broadcast channels,” submitted to *IEEE Trans. Inf. Theory*, Mar. 2014. Available at arXiv.
- [29] G. Lee and Y. Sung, “Asymptotically optimal simple user scheduling for massive MIMO downlink with two-stage beamforming,” *Proc. of SPAWC 2014*, (Toronto, CA), Jun. 2014.



- [30] J. Chen and V. Lau, "Two-tier precoding for FDD multi-cell massive MIMO time-varying interference networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1230–1238, Jun. 2014.
- [31] A. Liu and V. Lau, "Phase only RF precoding for massive MIMO systems with limited RF chains," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 17, pp. 4505–4515, Sep. 2014.
- [32] D. Kim, G. Lee, and Y. Sung, "Two-stage beamformer design for massive MIMO downlink by trace quotient formulation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 6, pp. 2200–2211, Jun. 2015.
- [33] M. Sadek, A. Tarighat, and A. H. Sayed, "A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 5, pp. 1711–1721, May 2007.
- [34] R. Zakhour and D. Gesbert, "Coordination on the MISO interference channel using the virtual SINR framework," in *Proc. Int. ITG Workshop Smart Antennas*, Berlin, Germany, Feb. 2009, pp. 1–7.
- [35] J. Park, G. Lee, Y. Sung, and M. Yukawa, "Coordinated beamforming with relaxed zero forcing: The sequential orthogonal projection combining method and rate control," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 12, pp. 3100–3112, Jun. 2013.
- [36] C. Doan, S. Emami, D. Sobel, A. Niknejad, and R. Brodersen, "Design considerations for 60 GHz CMOS radios," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 12, pp. 132–140, 2004.
- [37] Z. Pi and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101–107, 2011.
- [38] O. El Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. Heath, "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, Mar. 2014.
- [39] J. Mo and R. W. Heath Jr, "Capacity analysis of one-bit quantized MIMO systems with transmitter channel state information," (submitted to *IEEE Trans. Signal Process.*), arXiv preprint arXiv:1410.7353v2, Apr. 2015.
- [40] G. Lee, J. Park, Y. Sung, and J. Seo, "A new approach to beamformer design for massive MIMO systems based on k-regularity," in *Proc. IEEE GLOBECOM Workshops (GC'12 Workshop)*, Dec. 2012, pp. 686–690.
- [41] A. Alkhateeb, R. W. Heath Jr., and G. Leus, "Limited feedback hybrid precoding for multi-user millimeter wave systems," (to appear) *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2015.
- [42] J. Via, I. Santamaria, V. Elvira, and R. Eickhoff "A general criterion for analog Tx-Rx beamforming under OFDM transmissions," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 4, Apr. 2010.
- [43] C. Kim, T. Kim, and J.-Y. Seol, "Multi-beam transmission diversity with hybrid beamforming for MIMO-OFDM systems," in *Proc. IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, Atlanta, GA, Dec. 2013, pp. 61–65.
- [44] T. Bogale, L. Le, and A. Haghigat, "Hybrid analog-digital beamforming: How many RF chains and phase shifters do we need?," arXiv preprint arXiv:1410.2609v1, Sep. 2014.
- [45] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, pp. 506–522, Feb. 2005.
- [46] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, pp. 528–541, Mar. 2006.
- [47] A. Tomasoni and G. Caire and M. Ferrari and S. Bellini, "On the selection of semi-orthogonal users for zero-forcing beamforming," in *Proc. IEEE ISIT 2009*, Jul. 2009.
- [48] H. Hur, A. M. Tulino, and G. Caire, "Network MIMO with linear zero-forcing beamforming: Large system analysis, impact of channel estimation, and reduced-complexity scheduling," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, pp. 2911–2934, May 2012.
- [49] R. Zakhour and D. Gesbert, "A two-stage approach to feedback design in multi-user MIMO channels with limited channel state information," *IEEE PIMRC 07*, Sep. 2007.
- [50] M. Kountouris, D. Gesbert, and T. Salzer, "Enhanced multiuser random beamforming: Dealing with not so large



- number of user case," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 27, no. 8, Oct. 2008.
- [51] W. Xu and C. Zhao, "Two-phase multiuser scheduling for multiantenna downlinks exploiting reduced finite-rate feedback," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 59, no. 3, Mar. 2010.
- [52] J. Kim, W. Shin, Y. Hee, and J. Lee, "A novel channel feedback and user scheduling for massive MU-MIMO systems," KICS 2015.
- [53] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 48, pp. 1277-1294, Jun. 2002.
- [54] J. Chung, C. Hwang, K. Kim, and Y. K. Kim, "A random beamforming technique in MIMO systems exploiting multiuser diversity," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, pp. 848-855, Jun. 2003.
- [55] T. Al-Naffouri, M. Sharif, and B. Hassibi, "How much does transmit correlation affect the sum-rate scaling of MIMO Gaussian broadcast channels?," IEEE Trans. Commun., vol. 57, pp. 562-572, Feb. 2009.
- [56] Y. Huang, and B. D. Rao, "Random beamforming with heterogeneous users and selective feedback: Individual sum rate and individual scaling laws," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 5, May 2013.
- [57] S. Hur, T. Kim, D. J. Love, J. V. Krogmeier, T. A. Thomas, and A. Ghosh, "Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks," IEEE Trans. Commun., vol. 61, pp. 4391-4403, Oct. 2013.
- [58] C. N. Barati, S. A. Hosseini, S. Rangan, P. Liu, T. Korakis, and S. S. Panwar, "Directional cell search for millimeter wave cellular systems," in Proc. IEEE SPAWC 2014, (Toronto, Canada), Jun. 2014.
- [59] A. Alkhateeb, G. Leus, and R. W. Heath Jr., "Compressed sensing based multi-user millimeter wave systems: How many measurements are needed?," arXiv preprint arXiv:1505.00299v1, May 2015.
- [60] G. Lee, Y. Sung, and J. Seo, "Randomly-directional beamforming in millimeter-wave multi-user MISO downlink," arXiv preprint arXiv:1412.1665v2, May 2015.
- [61] G. Lee, Y. Sung, and S. Seo, "How many users are needed for non-trivial performance of random beamforming in highly directional mm-wave MIMO downlink?," to appear in Proc. IEEE ITW 2015 (Jeju, Korea), Oct. 2015.
- [62] G. Lee, Y. Sung, and M. Kountouris, "On the performance of randomly directional beamforming between line-of-sight and rich scattering channels," in Proc. IEEE SPAWC 2015, (Stockholm, Sweden), Jun. 2015.
- [63] G. Lee, Y. Sung, and M. Kountouris, "On the performance of random beamforming in sparse millimeter wave channels," submitted to IEEE J. Sel. Topics Signal Process., Jun. 2015.
- [64] J. L. Vicario, B. Bosisio, C. Anton-Haro, and U. Spagnolini, "Beam selection strategies for orthogonal random beamforming in sparse networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, pp. 3385-3396, Sep. 2008.



이길원

- 2010년 2월 KAIST 전기및전자공학부 (학사)
- 2012년 2월 KAIST 전기및전자공학부 (석사)
- 현재 KAIST 전기및전자공학부 박사과정

〈관심분야〉
무선통신, 통신신호처리



성영철

- 1993년 2월 서울대학교 전자공학과 (학사)
- 1995년 2월 서울대학교 전자공학과 (석사)
- 2005년 5월 코넬대학교 전기및컴퓨터공학(박사)
- 1995년 1월~2000년 6월 LG전자 선임연구원
- 2005년 10월~2007년 1월 Qualcomm Inc. Senior Engineer
- 2007년 2월~현재 KAIST 전기및전자공학과 부교수

〈관심분야〉

무선통신, 통신신호처리, 통계적 신호처리



소정호

- 2011년 2월 KAIST 전기및전자공학부 (학사)
- 2013년 2월 KAIST 전기및전자공학부 (석사)
- 현재 KAIST 전기및전자공학부 박사과정

〈관심분야〉

무선통신, 통신신호처리



서준영

- 2011년 2월 KAIST 전기및전자공학부 (학사)
- 2013년 2월 KAIST 전기및전자공학부 (석사)
- 현재 KAIST 전기및전자공학부 박사과정

〈관심분야〉

무선통신, 통신신호처리