

Massive MIMO 기술 이해

I. 서론

현재 통신 기술은 SU-MIMO (single user multi-input-multi-output)와 MU-MIMO (multi user MIMO)를 기반으로 진화하고 있다^[1]. MIMO 기술은 안테나가 많아지면 많아질수록 이론적으로 용량이 증가되지만 간섭 등 여러 제약 때문에 여전히 많은 연구들이 이루어지고 있다. SU-MIMO는 스트림(stream)간의 간섭, MU-MIMO는 스트림과 유저(user)간의 간섭, 그리고 다중 셀(multi-cell)에서 고려하는 MIMO에서는 셀 내부에서 오는 스트림과 유저간의 간섭뿐만 아니라 셀 외부에서도 오는 간섭들을 처리해주어야만 한다.

Massive MIMO는 기지국에서 무수히 많은 안테나를 사용하여 간섭과 잡음(noise)을 제거하고 송신 에너지를 최소화하는 기술이다. Massive MIMO의 장점은 선형(linear) 송수신 필터로 충분히 비선형(non-linear) 송수신 필터에 필적하는 성능에 도달할 수 있다는 점이다^{[2],[3]}. 따라서 안테나수가 많아지면 많아질수록 송수신 필터 디자인이 복잡해지는 MIMO기술임을 고려할 때 이런 제약조건이 사라지는 massive MIMO는 통신기술이 앞으로 나아가야할 필수 요소임을 시사한다.

이번 논문에서는 massive MIMO의 이해를 돕기 위해서 관련 연구들을 소개하고 massive MIMO 분석에 자주 사용하는 대수의 법칙(law of large numbers)과 Wishart 행렬을 소개한다. 또한, massive MIMO의 하향링크(down link) 분석을 파워 정규화(power normalization) 관점에서 다룰 것이다.



임연근
연세대학교



채찬병
연세대학교



II. 관련 연구

최근에는 무수히 많은 안테나를 기지국에 설치하는 massive MIMO 기술을 도입하여 간섭과 잡음을 제거하고 송신 파워를 최소화 하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 massive MIMO 기술에는 몇가지 해결해야할 문제들이 있다. 첫째, massive MIMO는 완벽한(perfect) 채널정보(channel state information: CSI)를 요구하기 때문에 TDD(time-division duplex) 시스템에서 주로 연구가 이루어졌다. 둘째, 인접셀에서 비직교 파일럿 시퀀스(non-orthogonal pilot sequence)를 사용하면 인접셀의 파일럿이 간섭으로 작용하게 되어 잘못된 채널정보를 수신하게 된다. 이를 pilot contamination이라 하고 이 문제를 해결하기 위해 여러 가지 연구가 이루어지고 있다^[4].

Massive MIMO에서 주로 사용하는 프리코더(pre-coder)는 정합필터(Matched filter: MF)이다. 정합필터를 사용하면 대수의 법칙에 의해서 간섭 및 잡음이 사라지게 되지만 pilot contamination이 여전히 SINR(signal-to-interference-plus-noise-ratio)에 영향을 주게 된다^[5]. 논문 [5]에서는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 환경에서 서비스 가능한 유저의 수와 재사용 계수(reuse factor)를 고려하였고 massive MIMO에서 앞으로 논의되어야할 문제들을 다양한 관점에서 제시하고 있다. 논문 [2]에서는 하향링크에서 안테나수(M)와 유저수(K)가 일정한 비율($M/K=\alpha$)로 무한대로 수렴할 때 정합필터와 ZF(zero-forcing) 빔포밍의 용량(capacity)을 구하였다. 논문 [6]에서는 마찬가지로 상향링크(uplink)에서 기지국이 각각 MRC(maximum ratio combining), ZF, 그리고 MMSE(minimum mean square error)를 사용하였을 때 용량을 구하였다. 상향링크에서 얼마나 많은 안테나를 사용하여야 massive MIMO의 이론적인 용량에 도달하는지 수학적 시뮬레이션을 통한 검증은 [7]에 소개되어 있다.

〈표 1〉은 pilot contamination이 고려된 상향링크에서 massive MIMO의 성능을 송수신 필터에 따라 보여

〈표 1〉 상향링크 massive MIMO 유저 당 성능

MRC	$\log_2 \left(1 + \frac{p_u(M-1)\beta_k}{p_u \sum_{i=1, i \neq k}^K \beta_i + 1} \right)$
ZF	$\log_2(1 + p_u(M-K)\beta_k)$

준다^[6]. 완벽한 채널정보를 가정하고 있으며 p_u 는 유저당 파워, β_k 는 large scale fading이 고려된 파라미터이다. 〈표 2〉는 하향링크에서 $M, K \rightarrow \infty, \alpha = \frac{M}{K}$ 의

비율로 수렴할 때, massive MIMO 성능을 보여준다^[2].

우리의 이전 연구 [8]에서는 모든 기지국이 서로 협력하는 네트워크 massive MIMO와 sum-power constraint을 고려한 하향링크에서 정합필터와 ZF의 용량 바운드(bound)를 파워 정규화 관점에서 구하였다. 네트워크 massive MIMO를 가정하였기 때문에 앞서 소개한 [2], [4]~[7] 논문과 달리 pilot contamination은 고려하지 않았다. 정합필터에서는 행렬 정규화를 사용하고 ZF에서는 벡터(vector) 정규화를 사용하였을 때 더 좋은 성능을 보였다. 또한 정합필터와 ZF가 몇 명의 유저를 서비스할 때 더 좋은 필터인지 결정하는 함수인 K_{cross} 를 소개하였다. 이번 논문에서는 massive MIMO에서 주로 사용하는 수학적 도구를 소개하고 우리의 이전 연구인 [8]에서 주장한 파워 정규화 관점의 분석을 간단히 소개하여 massive MIMO의 프리코딩 디자인 문제의 이해를 돕고자 한다.

III. Massive MIMO의 원리와 수학적 도구

Massive MIMO에서는 기지국에서 무수히 많은 안테나를 사용함으로써 가우시안 랜덤변수(Gaussian random variable)를 가지는 채널이 겪는 유효 채널(effective channel)의 확률적인 특성이 모델이 결정적인(deterministic) 특성으로 수렴하게 된다. III장에서는 위의 특성을 가지는 massive MIMO의 분석을 위해 주로 사용하는 수학적 도구인 대수의 법칙(law of

〈표 2〉 하향링크 massive MIMO 유저 당 성능

$$\left(M, K \rightarrow \infty, \alpha = \frac{M}{K} \right)$$

MF	$\log_2\left(1 + \frac{p_u \alpha}{p_u + 1}\right)$
ZF	$\log_2(1 + p_u(\alpha - 1))$

large numbers)과 Wishart 행렬을 이용한 수식들을 소개한다. 또한 이 수식들을 통해 massive MIMO의 원리를 설명한다. 이번 논문에서는 α 는 스칼라 (scalar), α^* 는 켈레복소수, α 는 벡터, A 는 행렬, A^* 는 에르미트(Hermitian) 행렬, A^T 는 전치(transpose) 행렬, $\|A\|_F$ 는 프로베니우스 놈(Frobenius norm), $\text{tr}(\)$ 은 대각합(trace), $E\{\}$ 는 평균, $\text{Var}(\)$ 은 분산, $\text{COV}(\)$ 는 공분산(covariance), $\sim \Gamma(k, \theta)$ 는 모양 매개변수 (shape parameter)와 크기 매개변수(scale parameter)가 각각 k 와 θ 인 감마(gamma) 분포 (distribution)를 나타낸다.

1. 대수의 법칙

수식 소개에 앞서 평균이 0인 i.i.d. (independent identically distribution) 확률변수의 특성에 대해 정리하여 이후 증명의 이해를 돕도록 하겠다. 평균이 0인 i.i.d. 확률변수 X 와 Y 가 있다고 하자. 두 확률변수는 독립이기 때문에 비상관(uncorrelated) 관계이다 ($\text{COV}(XY) = 0$). 두 독립 변수의 평균이 0이기 때문에 $\text{COV}(XY) = 0 \Leftrightarrow E\{XY\} = 0$ 이다. X^2 와 Y^2 역시 독립이기 때문에 $E\{X^2 Y^2\} = E\{X^2\} E\{Y^2\}$ 이다. 만약 X 가 분산이 1인 독립 복소 가우시안 랜덤변수(independent complex Gaussian random variable)이면 Rayleigh 분포와 감마 분포의 관계에 의해 $X^2 \sim \Gamma(1, 1)$ 의 분포를 가지므로 $E\{X^4\} = 2$ 이다.

유한한 평균과 분산을 가지는 X_1, Y_1, \dots 의 i.i.d. 확률 변수가 있을 때 $P\left[\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X_i\right] = 1$ 를 만족한다는 것을 대수의 법칙이라 한다. 아래의 Lemma들은 대

수의 법칙을 통해 도출된 massive MIMO에서 자주 사용하는 수식들이다. $K \times M$ 행렬 H 는 평균은 0, 분산은 1인 독립 복소 가우시안 랜덤변수를 원소(element)로 가지고 h_k, h_l 은 H^T 의 열(column) 벡터이다.

Lemma 1:

정합필터를 사용하는 유저의 유효 채널은 정합필터의 정보가 자신의 채널정보와 일치하면 1이고 자신의 채널정보와 일치하지 않으면 0이다. 즉, 무한개의 안테나를 사용하는 정합필터는 원하는 신호를 제외한 간섭 신호들을 제거한다.

a) $\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} h_k^* h_k = 1.$

b) $\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} h_k^* h_l = 0.$

증명 :

a) $\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} h_k^* h_k$
 $= \frac{1}{M} [h_{k,1}^* h_{k,2}^* \dots h_{k,M}^*] [h_{k,1} h_{k,2} \dots h_{k,M}]^T$
 $= \frac{|h_{k,1}|^2 + |h_{k,2}|^2 + \dots + |h_{k,M}|^2}{M}$
 $= E[|h_{k,m}|^2] = \text{Var}(h_{k,m}) = 1.$

b) $\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} h_k^* h_l$
 $= \frac{1}{M} [h_{k,1}^* h_{k,2}^* \dots h_{k,M}^*] [h_{l,1} h_{l,2} \dots h_{l,M}]^T$
 $= \frac{h_{k,1}^* h_{l,1} + h_{k,2}^* h_{l,2} + \dots + h_{k,M}^* h_{l,M}}{M}$
 $= E[h_{k,m}^* h_{l,m}] = 0.$

Lemma 2:

Lemma 2의 a), b)는 Lemma 1의 행렬 버전이며, c)는 프로베니우스 놈의 대수의 법칙을 적용한 식이다. Lemma 1과 Lemma 2의 a), b)가 의미 하는 것은 massive MIMO에서 정합필터를 사용하면 송신전력을 낮출 수 있고, 간섭이 완벽하게 사라진다는 것이다. $A \in \mathbb{C}^{M \times K}$, $A = [h_1 h_2 \dots h_K]$ 일 때 아래를 만족한다.

a) $\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} A^* A = I_K.$

$$b) \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \mathbf{A} \mathbf{A}^* = \mathbf{I}_M.$$

$$c) \lim_{M \rightarrow \infty} \|\mathbf{H}\|_F^2 = MK.$$

증명 :

$$a) \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \mathbf{A}^* \mathbf{A}$$

$$= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^* \mathbf{h}_1 & \cdots & \mathbf{h}_1^* \mathbf{h}_k & \cdots & \mathbf{h}_1^* \mathbf{h}_K \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_k^* \mathbf{h}_1 & & \mathbf{h}_k^* \mathbf{h}_k & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_K^* \mathbf{h}_1 & \cdots & \cdots & \cdots & \mathbf{h}_K^* \mathbf{h}_K \end{bmatrix} = \mathbf{I}_K.$$

b) a)와 동일한 방법으로 증명이 가능하다.

$$c) \lim_{M \rightarrow \infty} \|\mathbf{H}\|_F^2$$

$$= \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^K \sum_{k=1}^M |h_{k,m}|^2$$

$$= \sum_{m=1}^K M = MK.$$

Lemma 3:

Massive MIMO 정합필터의 유효채널 크기에 대한 대수의 법칙은 아래와 같다.

$$a) \lim_{M \rightarrow \infty} E[|\mathbf{h}_k^* \mathbf{h}_k|^2] = M^2 + M.$$

$$b) \lim_{M \rightarrow \infty} E[|\mathbf{h}_k^* \mathbf{h}_l|^2] = M.$$

증명 :

$$a) \lim_{M \rightarrow \infty} E[(\mathbf{h}_k^* \mathbf{h}_k)^2]$$

$$= E[(|h_{k,1}|^4 + |h_{k,2}|^4 + \cdots + |h_{k,M}|^4) + (|h_{k,1}|^2|h_{k,2}|^2 + |h_{k,1}|^2|h_{k,3}|^2 + \cdots)]$$

$$= ME[|h_{k,m}|^4] + M^2 E[|h_{k,m}|^2|h_{l,m}|^2]$$

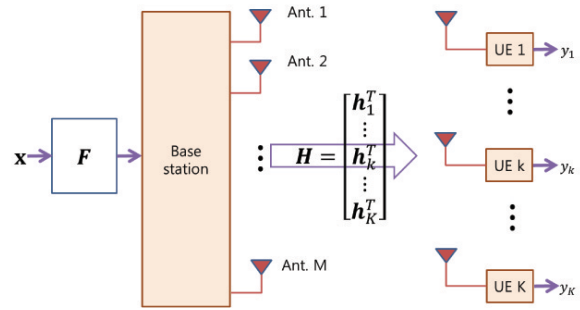
$$= 2M + M(M-1) = M^2 + M.$$

$$b) \lim_{M \rightarrow \infty} E[(\mathbf{h}_k^* \mathbf{h}_l)^2]$$

$$= E[(|h_{k,1}|^2|h_{l,1}|^2 + |h_{k,2}|^2|h_{l,2}|^2 + \cdots + |h_{k,M}|^2|h_{l,M}|^2) + (\mathbf{h}_{k,1}^* \mathbf{h}_{l,1} \mathbf{h}_{k,2}^* \mathbf{h}_{l,2} + \cdots)]$$

$$= ME[|h_{k,m}|^2|h_{l,m}|^2] + M^2 E[\mathbf{h}_{k,m}^* \mathbf{h}_{l,m} \mathbf{h}_{k,n}^* \mathbf{h}_{l,n}]$$

$$= M.$$



〈그림 1〉 Massive MIMO 시스템 모델

2. Wishart 행렬

$M \geq K$ 을 만족하는 $K \times M$ 행렬 \mathbf{H} 가 평균은 0인 독립 가우시안 랜덤변수를 원소(element)로 가질 때, $\mathbf{W} = \mathbf{H}\mathbf{H}^*$ 를 Wishart 행렬이라 한다. Wishart 행렬 \mathbf{W} 는 자유도(degree of freedom)가 M , 공분산 행렬이 Σ 인 $\mathbf{W} \sim W_K(M, \Sigma)$ 분포를 따르며 확률 분포 함수는 아래와 같다. Lemma 4는 Wishart 행렬 분석을 위한 수식 중 자주 사용하는 것들이다^[9].

$$f_{\mathbf{W}}(\mathbf{B}) = \frac{\pi^{-K(K-1)/2}}{\det \Sigma^M \prod_{i=1}^K (M-i)!} \exp(-\text{tr}\{\Sigma^{-1} \mathbf{B}\}) \det \mathbf{B}^{M-K}.$$

Lemma 4:

$$a) E\{\text{tr}(\mathbf{W})\} = MK.$$

$$b) E\{\text{tr}(\mathbf{W}^{-1})\} = \frac{K}{M-K}. \quad (\text{단, } M > K)$$

IV. 시스템 모델

〈그림 1〉에서 M 개의 안테나를 가진 기지국과 1개의 안테나를 가진 K 명의 유저를 서비스 하는 massive MIMO를 고려한다. 타 기지국간의 협력으로 서로의 파일럿 정보를 공유한다는 가정아래 pilot contamination은 고려하지 않는다. 또한, 모든 유저는 셀의 경계(cell boundary)에 위치하여 large scale fading은 고려하지 않는다. 채널은 플랫 페이딩(flat fading)이며 채널 행

렬의 각 원소는 평균은 0 분산은 1인 독립 복소 가우시안 랜덤변수이다. 채널 행렬 H 는 $K \times M$ 행렬이며 H^T 의 $K \times 1$ 열벡터 h_k 는 기지국과 번째 유저 사이의 채널 벡터이다.

Massive MIMO 시스템에서는 안테나수가 많아질수록 선형 프리코더가 비선형 프리코더 성능에 근접하기 때문에 프리코더와 디자인으로는 아래의 정합필터와 ZF를 사용한다.

$$\text{MF: } F = H^*(HH^*)^{-1} = [f_1 f_2 \cdots f_k \cdots f_K].$$

$$\text{ZF: } F = H^* = [f_1 f_2 \cdots f_k \cdots f_K].$$

$$y_k = \sqrt{P} h_k^T g_k s_k + \sum_{l=1, l \neq k}^K \sqrt{P} h_k^T g_l s_l + n_k. \quad (1)$$

식 (1)은 k 번째 유저의 수신신호이다. g_k 는 $M \times K$ 프리코딩 행렬 G 의 k 번째 열벡터, s_k 는 k 번째 유저의 심볼이며 n_k 는 k 번째 유저의 AWGN(additive white Gaussian noise) 벡터이다. 일반적으로 하향링크에서는 빔포밍 벡터의 행렬 또는 벡터 정규화를 파워정규화 고려한다. 식 (2)는 행렬 정규화 $g_k = f_k / (\sqrt{K} \|f_k\|)$, 식 (3)은 벡터 정규화 $g_k = f_k / (\|F\|_F)$ 를 사용한 k 번째 유저의 수신 신호이다.

$$y_k = \sqrt{P} h_k^T \frac{f_k}{\sqrt{K} \|f_k\|} s_k + \sum_{l=1, l \neq k}^K \sqrt{P} h_k^T \frac{f_l}{\sqrt{K} \|f_l\|} s_l + n_k. \quad (2)$$

$$y_k = \sqrt{P} h_k^T \frac{f_k}{\|F\|_F} s_k + \sum_{l=1, l \neq k}^K \sqrt{P} h_k^T \frac{f_l}{\|F\|_F} s_l + n_k. \quad (3)$$

V. 점근적 분석

V장에서는 하향링크에서 ZF와 MF의 프리코딩 방식에 따른 에르고딕(ergodic) 성능분석을 소개하여 어느 프리코딩방식이 적절한지 소개한다. 자세한 증명은 [8]에 소개되어 있다.

이 논문에서는 식 (4)의 쥘센의 부등식(Jensen's inequality)을 이용하여 용량의 하한(lower bound)과 상한(upper bound)을 구한 뒤 비교를 한다.

$$\log_2 \left(1 + \frac{1}{E\left(\frac{I+N}{S}\right)} \right) \leq E \left(\log_2 \left(1 + \frac{S}{I+N} \right) \right) \leq \log_2 \left(1 + E\left(\frac{S}{I+N}\right) \right). \quad (4)$$

1. Zero-forcing 에르고딕 성능

ZF의 특징은 역행렬의 성질을 이용하여 $h_k^T f_k = 1$, $h_k^T f_l = 0$ 이 되어 간섭신호가 0이 된다는 점이다.

a) 벡터 정규화 하한

식 (5)의 (a)는 ZF의 다양성 차수(diversity order)를 이용하여 구할 수 있다. ZF의 다양성 차수를 구하는 증명은 [10]에 소개되어 있다.

$$E_{ZF} \left\{ \frac{I+N}{S} \right\} = E \left\{ \frac{1}{P \left| h_k^T \frac{f_k}{\sqrt{K} \|f_k\|} \right|^2} \right\} = E \left\{ \frac{K \|f_k\|}{P} \right\} \stackrel{(a)}{=} \frac{1}{P} \frac{K}{M-K+1}. \quad (5)$$

b) 행렬 정규화 상한

식 (6)은 프로베니우스 놈과 대각합 사이의 관계식 $\|A\| = \text{tr}(\sqrt{A^*A})$ 을 사용하여 정리하고 lemma 4.b)를 통해 구할 수 있다.

$$E_{ZF} \left\{ \frac{S}{I+N} \right\} = E \left\{ \frac{P \left| h_k^T \frac{f_k}{\|F\|_F} \right|^2}{1} \right\} = \frac{P(M-K)}{K}. \quad (6)$$

c) 성능비교

식 (5)와 (6)을 통해 식(7)을 도출하면 벡터 정규화를 사용한 용량의 하한이 행렬 정규화의 상한보다 크다는 것을 알 수 있다. 즉, ZF를 사용하였을 때는 벡터 정규화 방법이 항상 더 높은 용량을 가진다.

$$\begin{aligned}
 & R_{ZF_{vec}}^L - R_{ZF_{mat}}^U \\
 &= \log_2 \left(1 + \frac{P(M-K+1)}{K} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{P(M-K)}{K} \right) \quad (7) \\
 &= \log_2 \left(1 + \frac{P}{K+P(M-K)} \right) \geq 0.
 \end{aligned}$$

2. 정합필터 에르고딕 성능

a) 행렬 정규화 하한

식 (8)은 Lemma 3과 Lemma 2.c)를 직접 대입하여 구할 수 있다.

$$\mathbb{E}_{MF} \left\{ \frac{I+N}{S} \right\} = \mathbb{E} \left\{ \frac{P \sum_{l=1, l \neq k}^K \left| \mathbf{h}_k^T \frac{\mathbf{f}_l}{\|\mathbf{F}\|_F} \right|^2 + 1}{P \left| \mathbf{h}_k^T \frac{\mathbf{f}_k}{\|\mathbf{F}\|_F} \right|^2} \right\} \quad (8)$$

$$\simeq \frac{P(K-1) + K}{P(M+1)}.$$

b) 벡터 정규화 하한

식 (9)는 식(8)과 마찬가지로 Lemma 3을 직접 대입하여 구한다.

$$\mathbb{E}_{MF} \left\{ \frac{S}{I+N} \right\} \simeq \frac{P(M+1)}{P(K-1) + K}. \quad (9)$$

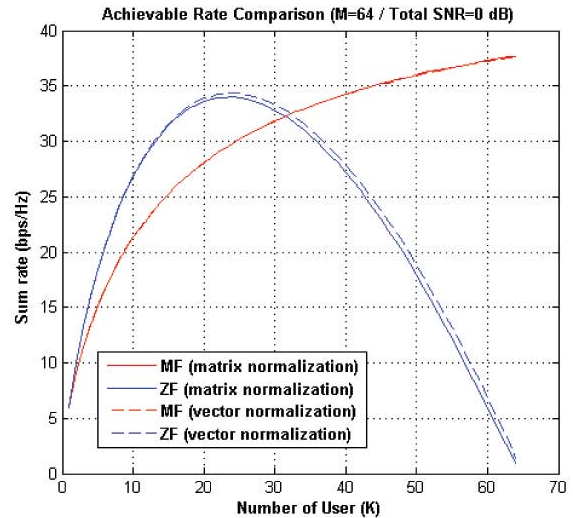
c) 성능비교

식 (8)와 (9)을 통해 식(10)을 도출하면 행렬 정규화를 사용한 용량의 하한이 벡터 정규화의 상한과 같다는 것을 알 수 있다. 즉, 정합필터를 사용하였을 때는 행렬 정규화 방법이 항상 더 높은 용량을 가진다.

$$R_{MF_{mat}}^L - R_{MF_{vec}}^U = 0. \quad (10)$$

VI. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 기지국의 안테나수는 64개($M=64$), 송신 SNR은 0dB를 사용하였고, 유저수 K 는 1명에서 64명까지 시뮬레이션 하였다. $R_{ZF_{vec}}^L$ 와 $R_{MF_{mat}}^L$ 는 오목



〈그림 2〉 M=64, 송신 SNR=0dB 일 때 유저수에 따른 sum rate

(concave) 함수이고, $R_{MF_{mat}}^L$ 는 K 에 대하여 단조 증가 함수이기 때문에 특정 유저수 이상에서는 정합필터 프리코더가 ZF 프리코더에 비해 더 좋은 성능을 보인다. ZF 프리코더는 벡터 정규화를 사용하였을 때 항상 좋은 성능을 보였고 정합필터 프리코더는 행렬 정규화를 사용하였을 때 항상 좋은 성능을 보였다. Massive MIMO는 낮은 송신전력을 가정하기 때문에 0dB에서의 시뮬레이션은 의미 있는 결과라 할 수 있다.

VII. 논의 및 결론

Massive MIMO는 기지국에서 무수히 많은 안테나를 사용하여 간단한 선형필터만으로 간섭을 제거하고 송신 전력을 최소화하는 기술이다. 이번 논문에서는 관련 연구를 통해 최근 massive MIMO의 연구 동향을 살펴보고 massive MIMO의 성능분석에서 자주 사용되는 대수의 법칙과 Wishart 행렬을 이용한 수식을 소개하였다. 대수의 법칙을 통해 massive MIMO를 사용하면 간섭이 제거되고 송신전력이 최소화됨을 확인하였다. Massive MIMO 하향링크 환경에서는 정합필터 프리코더를 사용할 때 행렬 정규화가 항상 좋은 성능을 보이고, ZF 프리코더를 사용할 때 벡터 정규화가 항상 좋

은 성능을 보였다.

Massive MIMO기술이 더욱 성숙해지기 위해서는 이번 논문에서 소개한 어떤 필터 디자인을 사용할 것인지에 대한 문제 외에도 a) 물리적으로 무수히 많은 안테나를 어떻게 구현할 것인지, b) FDD(frequency-division duplex) 시스템이나 pilot contamination 등에 의해 발생하는 부정확한 채널정보를 가지는 환경에서는 어떻게 사용할 것인지, c) 성능과 구현상의 복잡성 및 비용의 관계에서 가장 적당한 안테나 수는 몇 개인지 등 여러 문제들을 해결해야 된다. 또한, 유저가 1개의 안테나가 아닌 다중 안테나를 가졌을 때 적절한 송수신 필터를 디자인해야한다. 이는 단순한 BD (block diagonalization) 방식의 해결책이 아닌 논문 [11]에서 제안하는 CBF (coordinated beamforming)와 같이 송수신단에서 상호 협력하면서 반복계산이 없는 송수신 필터를 디자인하는 것이 해결책이 될 것이다.

VIII. 감사의 글

본 연구는 삼성전자 및 방송통신위원회의 방송통신인프라원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음 (KCA-2012-911-01-016).

참 고 문 헌

- [1] D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath Jr., C.-B. Chae, and T. Salzer, "From single user to multiuser communications: shifting the MIMO paradigm," *IEEE Sig. Proc. Mag.*, Vol. 24, No. 5, pp. 36-36, Sep. 2007.
- [2] 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 Large Arrays," *IEEE Sig. Proc. Mag.*, 2012.
- [3] C.-B. Chae and R. W. Heath, Jr., "On the optimality of linear multiuser MIMO beamforming for a two-user two-input multiple-output broadcast system," *IEEE Sig. Proc. Lett.*, Vol. 16, No. 2, pp. 117-120, Feb. 2009.
- [4] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and S. Vishwanath, "Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, Vol. 10, No. 8, pp. 2640-2651, Aug. 2011.
- [5] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," *IEEE Trans. Wireless Comm.*, Vol. 9, No. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [6] H. Ngo, E. Larsson, T. L. Marzetta, "Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems," *IEEE Trans. Comm.*, 2013.
- [7] J. Hoydis, J., S. ten Brink, M. Debbah, "Massive MIMO: How Many Antennas Do We Need?," *Proc. Allerton Conf. on Comm. Control and Comp.*, pp. 545-550, Sep. 2011.
- [8] C. Lee, C.-B. Chae, T. Kim, S. Choi, and J. Lee, "Network Massive MIMO for Cell-Boundary Users: From a Precoding Normalization Perspective," *Proc. of IEEE Globecom*, 2012.
- [9] A. M. Tulino and S. Verdú, "Random matrix theory and wireless communications," *Foundations and Trends in Comm. and Info. Th.*, Vol 1, No. 1, 2004.
- [10] K. K. Wong and Z. Pan, "Array gain and diversity order of multiuser MISO antenna systems," *Int. J. Wireless Inf. Networks*, Vol 2008, No. 15, pp 82-89, May 2008.
- [11] C.-B. Chae, D. Mazzaresse, N. Jindal, and R. W. Heath, Jr., "Coordinated beamforming with limited feedback in the MIMO broadcast channel," *IEEE Jour. Select. Areas in Comm.*, Vol 26, No. 8, pp. 1505-1515, Oct. 2008.



임연근

2012년 3월~현재 연세대학교 글로벌융합공학부
석박사 통합과정



채찬병

2011년 3월~현재 연세대학교 글로벌융합공학부
조교수