

다중 사용자 Massive MIMO 시스템의 파일럿 오버헤드를 고려한 최적 기지국 안테나 수 및 사용자 수 분석

정민채*, 최수용°

Optimal Numbers of Base Station Antennas and Users in Multiuser Massive MIMO Systems with Pilot Overhead

Minchae Jung*, Sooyong Choi°

요약

본 논문에서는 다중 사용자(multiuser)가 다수의 기지국 안테나(MIMO, Multiple-Input and Multiple-Output)를 동시에 사용하는 다중 사용자 massive MIMO 시스템 환경을 고려한다. 다중 사용자를 동시에 지원하기 위해 기지국에서는 ZFBF(Zero-Forcing Beamforming) 기법을 고려하고 수신 신호 검출을 위해 파일럿 신호를 고려한 하향 링크 프레임 구조를 적용하여 평균 셀 용량을 도출한다. 평균 셀 용량은 기지국 안테나 수 및 사용자 수에 대해 오목 함수 (concave function)임을 수식적으로 증명하고, 오목 함수 특징을 통해 최적의 기지국 안테나 수 및 사용자 수를 도출한다. 실험 결과를 통해 수식적으로 도출한 최적 값을 검증하고, 최적값 기반의 평균 셀 용량은 송신 SNR(Signal to Noise Ratio)에 비례하여 증가함을 확인할 수 있다.

Key Words : Multiuser, Massive MIMO, Ergodic Capacity, Zero-Forcing Beamforming (ZFBF), Pilot Overhead

ABSTRACT

In this paper, we consider multiuser massive multiple-input and multiple-output (MIMO) system where multiusers simultaneously utilize massive antennas of base station (BS). With a downlink frame structure considering pilot signals, we derive the ergodic cell capacity based on zero-forcing beamforming (ZFBF) technique. This paper proves that the ergodic cell capacity is concave function with respect to the numbers of BS antennas and users, and derives the optimum numbers of BS antennas and users maximizing ergodic cell capacity. From the simulation results, it is shown that the derived numbers of BS antennas and users has the optimum value for the maximum ergodic cell capacity, and the ergodic cell capacity with the derived optimum values increases with respect to the transmit SNR(Signal to Noise Ratio).

I. 서론

과거 단순 메시지 전송 및 음성 통화만을 지원하던

무선 단말기는 고 전송률, 고품질의 다양한 애플리케이션을 지원하는 스마트 기기로 진보하였고, 이러한 요구에 발맞추어 2020년 상용화를 목표로 전 세계적

* 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원(No.B0717-16-0024, IoT 환경에서 Massive connectivity를 위한 5G 기반 저전력, 저복잡도의 전송 및 변조-부호화 원천 기술 개발)과 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2016R1A6A3A11936259, 차세대 초저전력 IoT를 위한 Massive 안테나 기반 초장거리 통신시스템 연구)

• First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, hosaly@yonsei.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, csyong@yonsei.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2016-09-274, Received September 26, 2016; Revised November 23, 2016; Accepted November 23, 2016

으로 5G 이동 통신 시스템이 개발되고 있다^[1]. 특히 무선 통신 환경에서 기존에 사용하던 시간 및 주파수 자원의 한계에 따라, 고 전송률을 보장하기 위해 공간 자원을 적극적으로 활용하는 다중 안테나 시스템(MIMO, Multiple-Input and Multiple-Output)은 무선 통신 분야에서 많은 주목을 받고 있다^[2-3]. 이러한 다수의 공간 자원을 다수의 사용자에게 할당하는 다중 사용자(multiuser) MIMO 시스템에 대한 연구^[4-18]를 비롯하여 최근에는 다수의 기지국 안테나를 활용하는 massive MIMO 기술에 대한 연구가 5G 핵심 기술 중 하나로 활발히 연구되고 있다^[9-17]. Massive MIMO 시스템은 다수의 기지국 안테나 특징을 활용한 배열 이득(array gain)을 통해 커버리지 확대, 주파수 효율 및 링크 신뢰도를 향상시킬 수 있다^[9-10]. 하지만 다중 사용자를 동시에 지원하는 다중 사용자 massive MIMO 시스템에서는 사용자 간 간섭 문제가 발생한다^[9-12]. Massive MIMO 기술은 다수의 안테나를 통한 공간 자원을 적절한 빔형성 기법을 통해 다중 사용자 간 간섭을 제거하여 다중 사용자를 동시에 지원한다^[5-17]. 특히, Massive MIMO 시스템은 간단한 MF (Matched Filter) 기법 및 ZFBF (Zero-Forcing Beamforming) 기법을 통해 이상적인 채널 용량을 얻을 수 있는 장점이 있다^[9]. 또한 무한한 기지국 안테나 수의 가정하에 채널 경화 효과(channel hardening effect)를 활용하여 평균 셀 용량을 기지국 안테나의 수와 사용자의 수를 기반으로 한 간단한 수식으로 도출할 수 있다^[9].

본 논문에서는 단일 셀 단일 기지국이 다수의 사용자에게 신호를 전송하는 다중 사용자 MIMO 시스템을 고려한다. 특히 매우 많은 수의 기지국 안테나를 고려한 massive MIMO 시스템을 구성하며, 기지국이 ZFBF를 통해 사용자 간 간섭을 제거하면서 다수의 사용자에게 동시에 신호를 전송하는 하향 링크(downlink)를 고려한다. 본 논문에서는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 통해 자원을 할당한다고 가정하여 OFDM 하향 링크 프레임 구조를 고려한 평균 셀 용량을 분석한다. OFDM 하향 링크 프레임에는 데이터 신호 외에 채널 추정을 위한 파일럿 신호가 존재한다. 다중 사용자 massive MIMO 환경에서는 다수의 안테나로 인한 파일럿 오버헤드가 큰 문제로 작용하기 때문에 파일럿 오버헤드를 고려한 성능 분석이 필수적이다^[11-17]. 본 논문에서는 파일럿으로 인한 오버헤드를 고려한 평균 셀 용량을 수식적으로 도출하고, 이를 최대화하는 기지국 안테나 수 및 사용자 수를 최종적으로 도출한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 ZFBF

기반 다중 사용자 massive MIMO 시스템 모델을 정의한다. 3장에서는 파일럿 신호를 고려한 하향링크 프레임 구조 기반의 평균 셀 용량(ergodic cell capacity)을 도출하고 최적 기지국 안테나 수 및 사용자 수에 대한 분석을 진행한다. 4장에서는 제안한 최적 값에 대한 성능을 실험 결과를 통해 보이고, 5장의 결론으로 끝을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 M 개의 안테나를 가진 기지국이 단일 안테나를 가진 K 명의 사용자를 지원하는 단일 셀 환경을 고려한다. 단일 안테나를 가진 K 명의 사용자는 기지국을 통해 동시에 서비스를 받으며, 사용자 간 간섭을 제거하기 위해 기지국에서는 ZFBF를 적용하여 신호를 전송한다고 가정한다. 기지국에서 k 번째 사용자로의 채널을 \mathbf{h}_k 로 정의하고 채널 \mathbf{h}_k 는 $1 \times M$ 벡터 크기를 가지면서 벡터 내 원소들은 모두 평균이 0이고 분산이 1인 i.i.d. (independent and identically distributed) 복소 가우시안 랜덤 변수(complex Gaussian random variable)를 가정한다. 따라서 모든 사용자에게 대한 전체 채널 \mathbf{H}_S 는 $K \times M$ 크기를 가지며 다음과 같다.

$$\mathbf{H}_S = [\mathbf{h}_1^T \quad \mathbf{h}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{h}_K^T]^T$$

본 논문에서는 기지국에서 \mathbf{H}_S 에 대한 정보를 완벽하게 알고 있다고 가정하며, 따라서 ZFBF 행렬 \mathbf{W}_S 는 다음과 같다^[9,10].

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_S &= [\mathbf{w}_1 \quad \mathbf{w}_2 \quad \dots \quad \mathbf{w}_K] \\ &= (\mathbf{H}_S)^\dagger = \mathbf{H}_S^H (\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H)^{-1} \end{aligned}$$

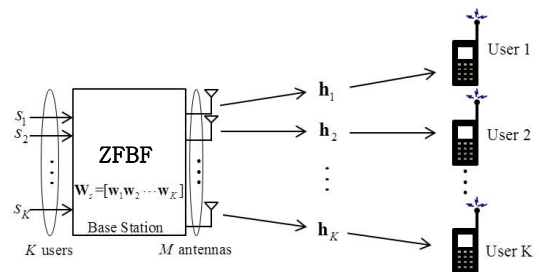


그림 1. ZFBF 기반 다중 사용자 MIMO 시스템
Fig. 1. ZFBF based multiuser MIMO system.

여기서 \mathbf{w}_k 는 k 번째 사용자의 ZFBF 벡터로써 $M \times 1$ 의 크기를 가지며, 전체 ZFBF 행렬 \mathbf{W}_s 는 $M \times K$ 의 크기를 가진다. $(\mathbf{A})^\dagger$ 는 \mathbf{A} 행렬의 pseudo 역행렬을 의미하며^[5], $(\mathbf{A})^H$ 와 $(\mathbf{A})^{-1}$ 는 각각 \mathbf{A} 행렬의 conjugate transpose와 역행렬을 의미한다. 또한, 기지국에서는 최대 M 개의 데이터 스트림을 보낼 수 있다고 가정하여 $M \geq K$ 이다^[9,10]. 기지국에서 ZFBF를 고려하여 신호를 전송하는 경우, k 번째 사용자의 수신 신호 y_k 는 다음과 같다.

$$y_k = \sqrt{P_{BS}} \mathbf{h}_k \frac{\mathbf{w}_k}{\|\mathbf{W}_s\|_F} s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \sqrt{P_{BS}} \mathbf{h}_k s_i + n_k$$

$$= \frac{\sqrt{P_{BS}}}{\|\mathbf{W}_s\|_F} s_k + n_k \quad (1)$$

여기서 P_{BS} 는 기지국에서의 하향 링크 총 송신 파워를 의미하고 s_k 는 k 번째 사용자로의 하향 링크 정보 신호로써 평균이 0이고 분산이 1인 독립적인 가우시안 랜덤 변수로 가정한다. 또한 $\|\mathbf{W}_s\|_F$ 는 기지국에서의 ZFBF 행렬 정규화 (normalization)를 위한 성분이며, n_k 는 부가 백색 가우시안 잡음 (AWGN, additive white Gaussian noise)으로써 $E[n_k n_k^*] = N_0$ 의 공분산 값을 갖는다. 여기서 a^* 와 $\|A\|_F$ 는 각각 a 값의 conjugate와 A 행렬의 Frobenious norm을 의미한다. 본 논문에서는 식의 간소화를 위해 $P_{BS}/N_0 = \rho$ 로 정의한다.

식 (1)을 기반으로 k 번째 사용자의 수신 신호대 잡음비 (SNR, signal to noise ratio) 및 용량 (capacity)은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$SNR_k = \frac{P_{BS} \rho}{N_0 \|\mathbf{W}_s\|_F^2} = \frac{\rho}{\|\mathbf{W}_s\|_F^2} \quad (2)$$

$$R_k = \log_2(1 + SNR_k) = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{\|\mathbf{W}_s\|_F^2} \right) \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 통해 k 번째 사용자의 수신 SNR 및 평균 용량은 사용자 인덱스 k 에 무관함을 확인할 수 있으며, 이는 ZFBF 기반의 각 사용자 성능이 모두 동일함을 의미한다. 따라서 셀 내 사용자 별 평균 용량의 합을 의미하는 셀 용량(cell capacity)은 다음이 표현된다.

$$R = K \log_2(1 + SNR_k) = K \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{\|\mathbf{W}_s\|_F^2} \right) \quad (4)$$

식 (4)에 표현된 셀 용량은 채널 발생에 따라 값이 변하는 랜덤 변수이며 그 값은 랜덤 변수인 $\|\mathbf{W}_s\|_F$ 값에 의존적(dependent)이다. 기존 연구 [9]에서는 식 (4)를 기반으로 평균 셀 용량 (ergodic cell capacity)에 대한 값을 다음과 같이 도출하였다.

$$E[R] = K \cdot E \left[\log_2 \left(1 + \frac{\rho}{\|\mathbf{W}_s\|_F^2} \right) \right] = K \log_2 \left(1 + \frac{\rho(M-K)}{K} \right) \quad (5)$$

여기에서 $E[R]$ 은 랜덤 변수 R 에 대한 ergodic한 평균값을 의미한다. 본 논문에서는 식 (5)를 기반으로 OFDM 기반 하향링크 프레임 구조를 적용한 평균 셀 용량 수식을 도출하여 분석을 진행한다.

III. 평균 셀 용량 최대화를 위한 최적 안테나 수 및 사용자 수 분석

본 논문에서는 그림 2와 같이 3GPP LTE (Long Term Evolution) 시스템을 기반으로 M 개의 기지국 안테나 별 독립적인 자원에 파일럿 신호를 전송하는 구조를 고려한다^[18]. 그림 2는 기지국 안테나가 4인 경우의 OFDM 기반 하향 링크 프레임 구조를 보여주며, 주파수 축 채널은 N_{smooth} 동안 동일한 값을 가지고 시간 축 채널은 T_{slot} 동안 동일한 값을 가진다고 가정한다^[10,16]. 그림 2의 하향 링크 프레임 구조를 고려하

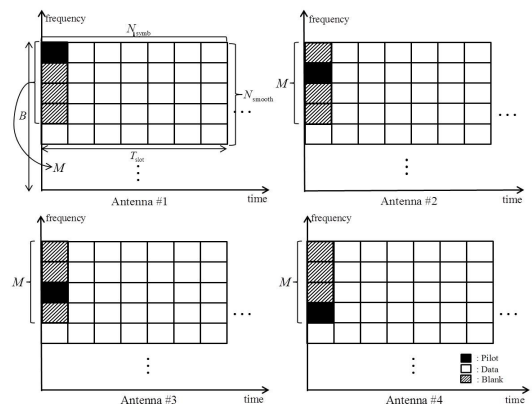


그림 2. 기지국 안테나가 4인 경우의 OFDM 기반 하향 링크 프레임 구조
Fig. 2. OFDM based downlink frame structure when $M=4$.

여 식 (5)의 하향 링크 평균 셀 용량은 다음과 같이 표현된다^[16].

$$R_E = \frac{BT_U}{T_S} \left(1 - \frac{M}{N_{SS}}\right) \cdot E[R] \quad (6)$$

$$= \frac{KBT_U}{T_S} \left(1 - \frac{M}{N_{SS}}\right) \log_2 \left(1 + \frac{\rho(M-K)}{K}\right)$$

여기서 $N_{SS}=N_{\text{symbl}}N_{\text{smooth}}$ 로 정의하며, N_{symbl} 는 T_{slot} 동안의 OFDM 심볼 수를 의미한다. 따라서 N_{SS} 는 채널이 시간 주파수 상 동일한 값을 가지는 자원 요소(resource element)의 수를 의미한다. T_S 는 전체 심볼 시간을 의미하고 T_U 는 실제 데이터가 전송되는 시간을 의미하여, T_U/T_S 는 전체 심볼 시간 중 하향 링크 데이터가 전송되는 시간 비율을 의미한다. B 는 하향 링크 시스템 대역폭(bandwidth)을 의미한다. 따라서 식 (6)은 평균 셀 용량을 의미하며 이를 최대화하기 위한 최적화 문제를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\max_{K,M} \frac{KBT_U}{T_S} \left(1 - \frac{M}{N_{SS}}\right) \log_2 \left(1 + \frac{\rho(M-K)}{K}\right), \quad (7)$$

s.t. $0 \leq K \leq M \leq N_{SS}$

ZFBF의 적용을 위해 전체 사용자 수는 기지국 안테나 수보다 작거나 같은 상황을 고려한다. 기지국 안테나 수는 N_{SS} 보다 작거나 같다고 가정하여 동일 채널 값을 가진 자원 내에서 M 개의 안테나에 대한 채널을 추정할 수 있도록 제한 조건(constraint)을 설정한다. 식 (7)의 목적 함수(objective function)에서 전체 사용자 수 K 와 기지국 안테나 수 M 은 서로 독립적인 변수이므로, 각 변수에 대한 독립적인 분석을 통해 분석할 수 있다. 기존 연구 [15]에서는 식 (7)의 목적 함수가 K 에 대해 오목 함수임을 증명하고 이를 기반으로 목적 함수를 최대화하는 최적 K 값을 도출하였다. [15]에 따르면 최적 K 값은 다음과 같이 표현된다.

$$K^* = c \cdot M,$$

$$\text{where } c = \begin{cases} \frac{1}{e} & \text{if } \rho=1, \\ \frac{\rho}{\rho-1} \frac{1}{1 + \frac{1}{LW\left(\frac{\rho-1}{e}\right)}} & \text{else.} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $LW(X)$ 는 Lambert-W 함수이며 $Y=LW(X)$

는 $Ye^Y=X$ 의 솔루션을 의미한다^[18]. 식 (8)에 따라 식 (7)은 다음과 같이 정리된다.

$$\max_M R_E^* = K^* \cdot \left(1 - \frac{M}{N_{SS}}\right) \log_2 \left(1 + \frac{\rho(M-K^*)}{K^*}\right)$$

$$\Leftrightarrow \max_M R_E^* = cM \cdot \left(1 - \frac{M}{N_{SS}}\right) \log_2 \left(1 + \frac{\rho(M-cM)}{cM}\right) \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow \max_M R_E^* = cM \cdot \left(1 - \frac{M}{N_{SS}}\right) \log_2 \left(1 + \frac{\rho(1-c)}{c}\right)$$

식 (9)의 목적 함수의 M 에 대한 특성을 파악하기 위해, 식 (9)의 목적 함수를 M 에 대한 2계 미분을 진행하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 R_E^*}{\partial M^2} = \frac{-2c \log_2 \left(1 + \frac{\rho(1-c)}{c}\right)}{N_{SS} \ln 2} \quad (10)$$

식 (10)은 항상 0보다 작거나 같기 때문에 R_E^* 는 M 에 대해 오목 함수임을 확인할 수 있다. 따라서 식 (9)의 목적 함수의 M 에 대한 1계 미분 값을 0으로 만족시키는 M 이 최적 M 값임을 알 수 있으며, 최적 M 은 다음과 같다.

$$\frac{\partial R_E^*}{\partial M} = \frac{c(N_{SS}-2M)}{N_{SS}}, M^* = \frac{N_{SS}}{2} \quad (11)$$

식 (11)에 따르면 N_{SS} 의 절반을 기지국 안테나로 설정하여 파일럿 오버헤드로 사용하기 때문에, 나머지 절반의 자원으로만 데이터 송수신이 가능하다. 하지만 식 (8)에 의해 나머지 절반의 자원을 $c \cdot M$ 명의 사용자가 공동으로 사용하기 때문에, 실질적으로는 공간 자원까지 포함하여 총 $cMN_{SS}/2$ 개의 자원으로 데이터 송수신할 수 있음을 의미한다. 식 (8)과 (11)을 통해 최적의 기지국 안테나 수 및 사용자 수를 얻을 수 있으며, 이를 평균 셀 용량에 적용하여 최대 평균 셀 용량을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$R_E^{\text{MAX}} = \frac{K^* BT_U}{T_S} \left(1 - \frac{M^*}{N_{SS}}\right) \log_2 \left(1 + \frac{\rho(M^*-K^*)}{K^*}\right)$$

$$= \frac{cN_{SS}BT_U}{4T_S} \log_2 \left(1 + \frac{\rho(1-c)}{c}\right) \quad (12)$$

where $K^* = \frac{cN_{SS}}{2}, M^* = \frac{N_{SS}}{2}$

즉 최적 기지국 안테나 수 및 사용자 수는 모두 N_{SS} 에 비례함을 알 수 있다. 이러한 경향은 [16]에서 도출한 MF (Matched Filter) 기반의 massive MIMO 환경에서의 최적 사용자 수 및 안테나 수와 동일하다. [16]에 따르면 MF 기반 최적 사용자 수 및 안테나 수, 최대 평균 셀 용량은 다음과 같다.

$$M_{MF}^* = K_{MF}^* = \frac{N_{SS}}{2} \quad (13)$$

$$R_{E, MF}^{MAX} = \frac{N_{SS}BT_U}{4T_S} \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{\rho+1} \right)$$

식 (12)와 (13)의 비교를 통해 ZFBF와 MF의 송신 SNR (ρ) 영역에 따른 성능 비교 및 성능 교차점을 수식적으로 도출할 수 있다. 성능 교차점 도출을 위해 식 (12)와 (13)을 다음과 같이 등식 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{cN_{SS}BT_U}{4T_S} \log_2 \left(1 + \frac{\rho(1-c)}{c} \right) = \frac{N_{SS}BT_U}{4T_S} \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{\rho+1} \right)$$

$$\Leftrightarrow c \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho(1-c)}{c} \right) = \ln \left(1 + \frac{\rho}{\rho+1} \right) \quad (14)$$

식 (8)에 의해 c 값은 상수 혹은 ρ 관련 변수로 표현되기 때문에, ZFBF와 MF의 성능 교차점은 식 (14)의 1차 방정식 풀이를 통해 도출할 수 있다. 식 (14)는 다음과 같이 재구성된다.

$$c \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho(1-c)}{c} \right) = \ln \left(1 + \frac{\rho}{\rho+1} \right)$$

$$\Leftrightarrow c \cdot \left(LW \left(\frac{\rho-1}{e} \right) + 1 \right) = \ln \left(1 + \frac{\rho}{\rho+1} \right) \quad (15)$$

$$\Leftrightarrow LW \left(\frac{\rho-1}{e} \right) = \frac{\rho-1}{\rho} \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho}{\rho+1} \right)$$

여기서 $\rho = 1$ 일 경우 식 (14)가 만족하지 않기 때문에, (a)는 식 (8)의 $\rho \neq 1$ 일 경우의 c 값과 다음의 Lambert-W 함수 특징을 활용하여 얻을 수 있다^[18].

$$e^{LW(x)} = \frac{x}{LW(x)}$$

식 (15)는 닫힌 형태(closed form)로 도출하기 어렵

기 때문에, 성능 교차점은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_{crs} = \left\{ \rho \left| LW \left(\frac{\rho-1}{e} \right) = \frac{\rho-1}{\rho} \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho}{\rho+1} \right) \right. \right\} \quad (16)$$

컴퓨터 프로그램을 통해 식 (16)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho_{crs} \approx 1.4822 = 1.7091 \text{ dB} \quad (17)$$

송신 SNR의 증가에 따라 ZFBF 기반의 성능은 식 (12)에 따라 무한히 증가한다. 하지만 MF 기반의 성능은 $N_{SS}BT_U/4T_S$ 에 수렴하기 때문에^[16], 두 기법의 성능은 다음의 우위관계를 만족한다.

$$\begin{cases} R_{E, MF}^{MAX} \geq R_{E, ZF}^{MAX} & \text{if } \rho \leq \rho_{crs}, \\ R_{E, MF}^{MAX} < R_{E, ZF}^{MAX} & \text{else.} \end{cases}$$

결론적으로, massive MIMO로 동작하는 각 기지국 은 송신 파워 값에 기반하여 상황에 따라 ZFBF 및 MF 기법을 효율적으로 선택하여 시스템 성능을 향상시킬 수 있다.

IV. 실험 결과

본 장에서는 다중 사용자 massive MIMO 시스템에서 ZFBF를 고려한 평균 셀 용량에 대한 실험을 진행하였다. 실험은 3GPP LTE 표준^[9]을 기반으로 파라미터를 설정하였으며 실험에 사용된 파라미터는 표 1과 같다. 실험 결과에 표기된 ‘Monte Carlo’는 i.i.d. 한 복소 가우시안 랜덤 변수로 채널을 발생시키고 기지국에서 ZFBF를 적용한 후의 셀 용량을 ergodic하게 평균값을 도출한 결과를 의미한다. 또한 ‘Theoretical Result’는 식 (6) 및 (12)를 통한 수식적인 평균 셀 용량을 구현한 결과를 의미한다. 결과 그래프 내 송신 SNR은 모두 dB 단위로 설정하였다.

그림 3은 송신 SNR을 10 dB로 고정된 상태에서 기지국 안테나 수 및 사용자의 수가 변화함에 따른 평균 셀 용량 결과를 보여준다. 실험을 통한 결과를 기반으로 도출된 최대 평균 셀 용량은 그림 3의 네모 박스에 표기된 바와 같이, 8.656×10^2 Mbps 이며, 해당 사용자 수 및 안테나 수는 $M = 105, K = 61$ 이다. 식 (12)를 통한 최대 평균 셀 용량은 8.6558×10^2 Mbps, 최적 사용자 수 및 안테나 수는 각각 $M = 105, K =$

표 1. 실험 환경

Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
System bandwidth (B)	10 MHz
Coherence time	500 us
Time duration for a time slot (Tslot)	500 us
Symbol interval (TS)	71.4 us
Useful symbol duration (TU)	66.7 us
Frequency flat interval (Nsmooth)	30 subcarriers
# of OFDM symbols in a time slot (Nsymb)	7 OFDM symbols

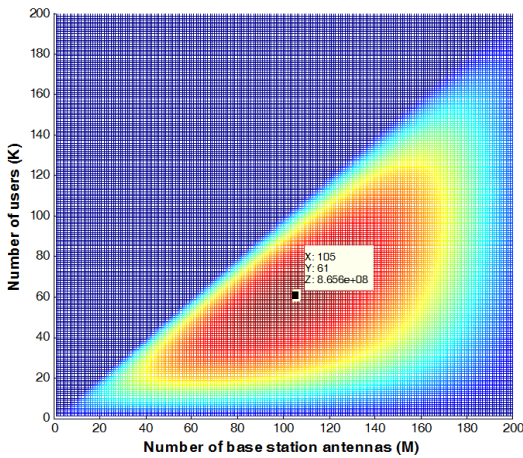


그림 3. 기지국의 송신 SNR이 10 dB일 경우의 기지국 안테나 수 및 셀 내 사용자 수에 따른 ZFBF 기반 셀 용량
Fig. 3. ZFBF based ergodic cell capacity when transmit SNR = 10 dB.

61.14 임을 수식적으로 도출할 수 있으며 이는 실험을 통한 결과와 일치함을 확인할 수 있다.

그림 4는 기지국 안테나 수가 200개, 송신 SNR이 10 dB인 상황에서 셀 내 사용자의 수를 변화시키면서 도출한 평균 셀 용량을 보여준다. 기존 연구 [9]에서 도출한 평균 셀 용량은 실제 실험을 통한 결과 값과 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한 기존 연구 [15]에서 증명한 바와 같이, 평균 셀 용량은 셀 내 사용자 수에 대한 오목 함수 특징을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 식 (8)에서 구한 최적 사용자 수는 $K = 116.46$ 이며, 이는 그림 4에서 최대값을 보여주는 사용자 수 $K = 116$ 과 유사함을 확인할 수 있다.

그림 5는 송신 SNR이 10 dB이고 식 (8)의 최적 셀 내 사용자 수를 적용한 상황에서 기지국 안테나의 수를 변화시키면서 도출한 평균 셀 용량을 보여준다. 식

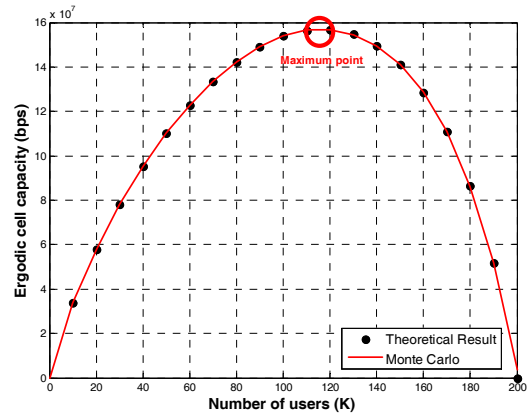


그림 4. 기지국의 송신 SNR이 10 dB, 기지국 안테나 수가 200 개일 경우 셀 내 사용자 수에 따른 ZFBF 기반 셀 용량
Fig. 4. ZFBF based ergodic cell capacity when transmit SNR = 10 dB and $M = 200$

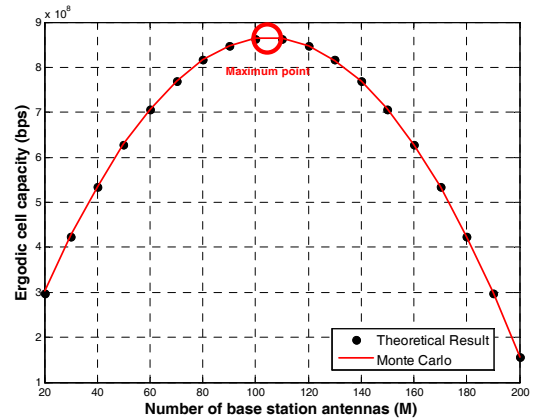


그림 5. 기지국 송신 SNR이 10 dB이고 최적 사용자 수를 적용한 경우, 기지국 안테나 수에 따른 ZFBF 기반 셀 용량
Fig. 5. ZFBF based ergodic cell capacity for optimal K when transmit SNR = 10dB.

(10)과 (11)에서 분석한 바와 같이 평균 셀 용량은 기지국 안테나 수에 대하여 오목 함수임을 확인할 수 있으며, 최적 기지국 안테나 수는 실험 결과와 식 (11)의 결과가 동일하게 $M = 105$ 로 나타남을 확인할 수 있다.

그림 6은 식 (12)의 최적 사용자 수 및 기지국 안테나 수를 적용한 평균 셀 용량을 송신 SNR에 따라 도출한 결과를 보여준다. 채널 추정 정보가 완벽하다고 가정하였기 때문에 사용자 간 간섭은 ZFBF를 통해 완벽하게 제거된다. 따라서 송신 SNR이 증가함에 따라 최대 평균 셀 용량이 비례하여 증가함을 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

그림 7은 기지국의 송신 SNR이 10 dB이며 식 (12)

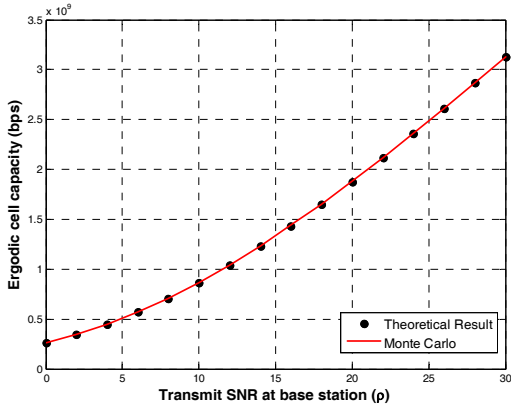


그림 6. 최적 기지국 안테나 수 및 사용자 수를 적용한 경우, 기지국 송신 SNR에 따른 셀 용량
Fig. 6. ZFBF based ergodic cell capacity for optimal M and K .

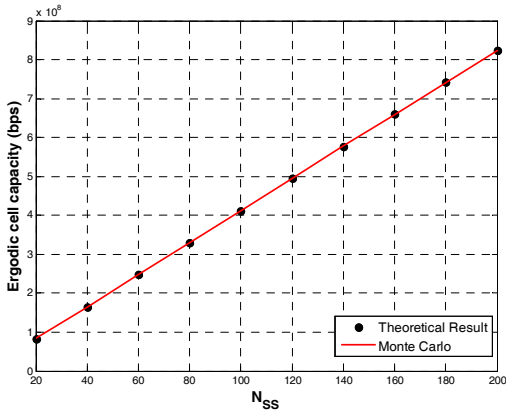


그림 7. 기지국 송신 SNR이 10 dB이고 최적 기지국 안테나 수 및 사용자 수를 적용한 경우, NSS에 따른 ZFBF 기반 셀 용량
Fig. 7. ZFBF based ergodic cell capacity for optimal M and K when transmit SNR = 10 dB.

의 최적 사용자 수 및 기지국 안테나 수를 적용한 평균 셀 용량을 N_{ss} 에 따라 도출한 결과를 보여준다. N_{ss} 의 증가는 채널 상태가 동일한 자원 요소의 수가 증가함을 의미하고, 이에 따라 채널 추정에 필요한 파일럿 신호의 수를 제외한 데이터 전송량의 증가를 의미하기 때문에 그림 7과 같이 N_{ss} 의 증가에 따라 최대 평균 셀 용량은 비례하여 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다.

그림 8은 최적 사용자 수 및 기지국 안테나 수를 적용한 ZFBF 및 MF의 평균 셀 용량을 송신 SNR에 따라 도출한 결과이다. 식 (16)과 (17)에서 도출한 결과와 유사하게 1.7 dB에서 1.8 dB 사이에 교차지점이

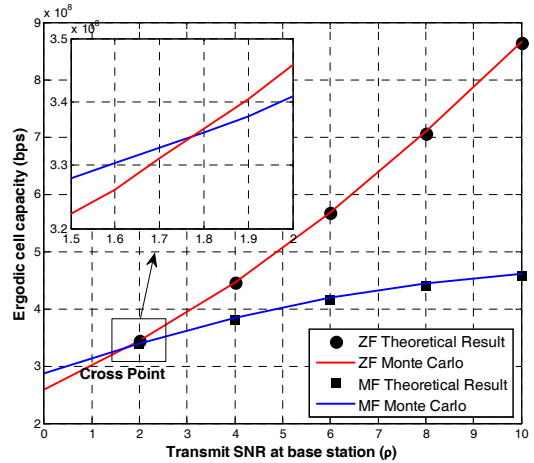


그림 8. 최적 기지국 안테나 수 및 사용자 수를 적용한 경우, 기지국 송신 SNR에 따른 ZFBF 및 MF 셀 용량 비교
Fig. 8. Comparison of ZFBF based ergodic cell capacity with MF based ergodic cell capacity for optimal M and K .

있음을 확인할 수 있다. 식 (16) 및 (17)은 무한한 기지국 안테나를 가정하여 도출된 결과를 바탕으로 진행된 분석이지만, 유한한 경우의 안테나 수(그림 8의 경우, $M = 105$)에서도 어느 정도 정확한 결과를 보임을 실험을 통해 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 다중 사용자 massive MIMO 시스템에서 ZFBF를 고려한 평균 셀 성능에 대한 분석을 진행하였다. Massive MIMO 시스템의 주요 문제 중 하나인 파일럿 오버헤드를 반영하여, 다중 사용자 하향 링크 프레임 구조를 고려하였고, 이를 기반으로 평균 셀 성능을 수식적으로 도출하였다. 하향 링크 프레임 구조를 기반으로 한 평균 셀 성능은 셀 내 사용자 수 및 기지국 안테나 수에 대해 오목 함수임을 수식적으로 증명하였고 이를 실험을 통해 확인하였다. 또한 평균 셀 성능을 최대화 하는 최적 셀 내 사용자 수 및 기지국 안테나 수를 수식적으로 도출하였고, 실험을 통해 이론적 성능 분석이 실험적 결과와 일치함을 확인하였다. 본 논문에서는 기지국에서 각 사용자로의 채널 정보를 기지국에서 완벽히 안다는 가정 하에 분석을 진행하였기 때문에 다중 사용자 간 간섭은 완벽하게 제거되었다. 하지만 현실적인 무선 통신 시스템에서 이러한 가정은 한계가 있기 때문에, 채널 추정 오차 (channel estimation error)에 따른 분석이 추가적으로 수행되어야 하며, 이는 우리의 향후 연구 과제

로 남아있다.

References

- [1] G. Lee, Y. Sung, J. So, and J. Seo, "Research trend for 5G massive MIMO realization (5G Massive MIMO 실현을 위한 연구 동향)," *Mag. IEIE*, vol. 42, no. 10, pp. 858-876, Oct. 2015.
- [2] A. J. Paulraj and T. Kailath, *Increasing capacity in wireless broadcast systems using distributed transmission/directional reception*, U.S. Patent, no. 5,345,599, 1994.
- [3] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 10, no. 6, pp. 585-595, Nov./Dec. 1999.
- [4] H. Ngo, E. Larsson, and T. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449, Feb. 2013.
- [5] C. Peel, B. Hochwald, and A. Swindlehurst, "A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication-part I: channel inversion and regularization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 1, pp. 195-202, Jan. 2005.
- [6] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 528-541, Mar. 2006.
- [7] C. Chae, S. Shim, and R. Heath, "Block diagonalized vector perturbation for multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 11, pp. 4051-4057, Nov. 2008.
- [8] H. Sung, S. Lee, and I. Lee, "Generalized channel inversion methods for multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 11, pp. 3489-3499, Nov. 2009.
- [9] F. Rusek, D. Persson, B. Lau, E. Larsson, T. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Jan. 2013.
- [10] T. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [11] Y. Lim, C. Chae, and G. Caire, "Performance analysis of massive MIMO for cell-boundary users," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 12, pp. 6827-6842, Dec. 2015.
- [12] M. Jung, T. Kim, K. Min, Y. Kim, J. Lee, and S. Choi, "Asymptotic distribution of system capacity in multiuser MIMO systems with large number of antennas," in *Proc. IEEE VTC Spring*, pp. 1-5, Dresden, Germany, Jun. 2013.
- [13] B. Hochwald and S. Vishwanath, "Space-time multiple access: Linear growth in the sum rate," in *Proc. 40th Annu. Allerton Conf. Commun., Contr. Comput.*, Monticello, IL, Oct. 2002.
- [14] S. Wagner, R. Couillet, M. Debbah, and D. Slock, "Large system analysis of linear precoding in correlated MISO broadcast channels under limited feedback," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 7, Jul. 2012.
- [15] M. Jung, Y. Kim, J. Lee, and S. Choi, "Optimal number of users in zero-forcing based multiuser MIMO systems with large number of antennas," *J. Commun. and Networks (JCN)*, vol. 49, no. 4, pp. 362-369, Aug. 2013.
- [16] M. Jung and S. Choi, "Optimal number of base station antennas and users in MF based multiuser massive MIMO systems," *J. KICS*, vol. 38A, no. 08, pp. 724-732, Aug. 2013.
- [17] K. Min, M. Jung, T. Kim, Y. Kim, J. Lee, and S. Choi, "Pilot power ratio for uplink sum-rate maximization in zero-forcing based MU-MIMO systems with large number of antennas," in *Proc. IEEE VTC Fall*, Las Vegas, USA, Sept. 2013.
- [18] R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey, and D. E. Knuth, "On the lambert w-function," *Advances in Computational Math.*, vol. 5, no. 1, pp. 329-359, Dec. 1996.
- [19] 3GPP TS 36.211 v8.6.0, *Physical channels*

and modulation (Release 8), Mar. 2009.

정민채 (Minchae Jung)



2008년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 졸업
2014년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 박사
2013년 7월~2016년 6월 : 한국전
기연구원(KERI) 선임기술원

2016년 7월~현재 : 연세대학교 산학협력단 박사 후
연구원

<관심분야> Massive MIMO, SWIPT, Cognitive radio
network, Body area network, D2D communication

최수용 (Sooyong Choi)



1995년 8월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업
1997년 8월 : 연세대학교 전자
공학과 석사
2001년 8월 : 연세대학교 전자
공학과 박사
2002년 3월~2004년 8월 : Univ.

of California, San Diego, Postgraduate Researcher
2004년 9월~2005년 7월 : Oklahoma State Univ,
Researcher

2005년 9월~2011년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과
조교수

2011년 9월~2016년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과
부교수

2016년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 정교수
<관심분야> Massive MIMO, Multicarrier transmission
techniques (OFDM, FBMC, etc.), Interference
management/coordination/cancellation/mitigation,
Detection and estimation, Iterative receivers, 무선 통
신 시스템, Cognitive radios