

제한된 용량의 프런트홀 링크를 가진 클라우드 무선접속 네트워크 시스템의 상향링크 Sum-Rate 성능에 관한 연구

유대성*, 이진우*, 김준범*, 박석환^o

Study on the Achievable Sum-Rate in the Uplink of Cloud Radio Access Networks with Finite-Capacity Fronthaul Links

Daeseong Yu*, Jinwoo Lee*, Junbeom Kim*, Seok-Hwan Park^o

요약

본 논문은 클라우드 무선접속 시스템 (Cloud radio access network: C-RAN)의 상향링크를 고려한다. 일반적으로 무선 기지국 (remote radio head: RRH)와 기저대역 신호처리 (baseband processing unit: BBU)를 연결하는 프런트홀 링크들은 제한된 데이터 전송 용량을 갖기 때문에, 프런트홀 링크를 효율적으로 활용하는 프런트홀 양자화 및 압축 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 네트워크 정보이론의 결과를 활용한 고급 프런트홀 압축 기술들을 소개하고, 서로 다른 기술들 간의 성능을 비교한다. 우선 BBU에서 각 RRH들로부터 받은 양자화 신호들을 개별적으로 회복하는 점대점 프런트홀 압축 기술을 소개한다. 또한 BBU는 여러 RRH들로부터 수신하는 양자화 결과물들을 한 곳에서 회복할 수 있으므로, 그들 간의 통계적 상관도를 활용한 분산 프런트홀 압축 기술을 적용함으로써 연계 되는 양자화 잡음 신호의 감소 효과와 시스템 용량 향상 효과도 관찰한다.

Key Words : Cloud radio access networks, sum-rate, uplink, fronthaul links

ABSTRACT

This work considers the uplink of a cloud radio access network (C-RAN). Since digital fronthaul links that connects remote radio heads (RRHs) to baseband processing unit (BBU) have finite capacity, there have been a lot of research works that studied advanced fronthaul quantization and compression techniques to make an efficient use of fronthaul links. In this work, some advanced fronthaul compression techniques inspired by network information theory are introduced with some performance evaluation results presented. Basic point-to-point (P2P) compression technique is first reviewed in which the decompression of the signals received from different RRHs are separately carried out, and then distributed fronthaul compression technique is presented which leverages the statistical correlation among the received signals of different RRHs. For P2P compression, we consider both per-sample uniform scalar quantizer and Gaussian vector quantizer based on rate-distortion theoretic analysis.

* 본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2015R1C1A1A01051825).

• First Author : Chonbuk National University, Division of Electronic Engineering, imcreative93@naver.com, 학생회원

o Corresponding Author : Chonbuk National University, Division of Electronic Engineering, seokhwan@jbnu.ac.kr, 정회원

* Chonbuk National University Division of Electronic Engineering, ejw329@naver.com, 93101325@naver.com, 학생회원

논문번호 : KICS2017-04-122, Received April 26, 2017; Revised June 30, 2017; Accepted June 30, 2017

I. 서 론

5세대 이동통신 시스템의 요구 조건 중 하나인 초고속 통신을 달성하기 위해, 밀리미터파 주파수 대역의 사용이 고려되고 있으나^{1,3)}, 해당 주파수 신호의 심각한 무선 경로감쇠 효과로 인해 광범위한 셀룰러 통신에 적합하지 않을 수 있다. 이를 해결하기 위해 소형 셀 및 이기종 기지국 기반의 초고밀도 (ultra-dense) 셀룰러 네트워크망이 개발 중이다. 기지국들 간의 이격 거리가 작아지면서 발생하게 되는 계층 간 (inter-tier) 혹은 계층 내 (intra-tier) 셀 간 간섭 신호로 인한 성능 손실이 심각하다^{4,5)}.

이러한 셀 간 간섭 문제를 효과적으로 해결하기 위한 기술로 클라우드 무선접속 네트워크 (Cloud radio access network: C-RAN) 시스템이 적합한 것으로 알려져 있다⁶⁻⁹⁾. C-RAN 시스템은 기존에 각 기지국에서 자율적으로 수행되던 기저대역 신호처리 기능을 클라우드 (cloud) 혹은 중앙 프로세서 (central processor)라고도 불리는 기저대역 신호처리 노드 (Baseband processing unit: BBU)로 몰아줌으로써 광범위한 영역에서 발생하는 간섭 신호들의 효과적인 제어를 가능하게 할 것으로 기대된다⁶⁻⁹⁾.

그러나 C-RAN 시스템을 실제로 구현하기 위해서는 무선 기지국 (Remote radio head: RRH)과 BBU를 연결하는 프런트홀(fronthaul) 링크의 안정적인 동작이 전제되어야 하는데, 현실적으로 프런트홀 링크들은 그 데이터 용량이 제한되어 있으므로, 제한된 용량의 프런트홀 링크를 효율적으로 활용하는 프런트홀 압축 기술에 대한 연구가 필수적이다⁸⁾. 현재 표준화를 통해 정해진 프런트홀 통신 규격은 없으나, 여러 top-tier 산업체들 간에 동의된 프런트홀 규격은 Common Public Radio Interface (CPRI) 기술로 알려져 있다¹⁰⁾. CPRI 기술은 기저대역 신호 샘플들을 각 샘플별 및 안테나 별로 스칼라 양자화 잡음을 수행하는 가장 간단한 구조를 가정하고 있다.

본 논문에서는 Rate-Distortion 이론 관점에서 최적인 Gaussian 압축 기법¹¹⁾ 및 실제 구현에 적합한 샘플별 균일 양자화 기술¹²⁾을 프런트홀 압축에 적용할 때 획득 가능한 sum-rate 성능을 분석한다. 또한 서로 다른 RRH들의 수신 신호 간의 통계적 상관도를 활용하여 프런트홀 데이터량을 감소시키는 분산 압축 기술^{13,14)}의 sum-rate 성능을 관찰한다. 특히, BBU에서 RRH들의 양자화 신호를 순차적으로 복호화한다는 가정 하에, 랜덤 순서 및 최적 순서의 복호화 성능을 모두 고려한다. 다양한 환경에서의 모의실험을 통해 기

존 단일 셀 기반의 상향링크 시스템, 가우시안 및 균일 프런트홀 압축 기술, 분산 압축 기술들의 sum-rate 성능들을 비교 및 분석하며, BBU에서 프런트홀 압축 및 UE 채널 코딩에 대한 복호화를 합동적으로 수행하는 시스템의 성능도 함께 분석한다. 또한 기존 알려진 상한 중 단단(tight)하다고 알려진 cut-set 상한 성능¹⁵⁾도 함께 비교한다. 특히 특정 실험 환경에서는 프런트홀 압축 방식에 따라 100% 이상의 성능 차이를 보이며, 성능이 좋지 않은 프런트홀 압축 기술을 사용하면 양자화에 의한 잡음으로 인해 기존의 셀룰러 시스템과 열화된 성능을 보이기도 하는 것을 관찰한다.

수학적 표기: $CN(\mu, \sigma^2)$ 는 평균 μ , 분산 σ^2 인 복소 가우시안 분포를 표시하며, $\det(A)$ 는 정방행렬 A 의 determinant 값을 취하는 함수이다. $I(X; Y)$ 는 랜덤변수 X 와 Y 간의 상호정보량(mutual information)을 의미하고, $h(X)$ 는 랜덤변수 X 의 differential entropy를 의미하며, $E(\cdot)$ 는 입력 랜덤변수의 통계적 기대치를 취하는 함수이다. $(\cdot)^*$ 은 켈레복소수, $(\cdot)^H$ 은 Hermitian 대치행렬을 의미하고, $\|\cdot\|$ 은 절대값, $\det(\cdot)$ 은 행렬식을 뜻한다.

II. 시스템 모델: C-RAN 상향링크

본 논문에서는 클라우드 무선접속 네트워크 시스템의 상향링크를 고려한다. 해당 시스템에서는 그림 1과 같이 N_U 개의 단말 사용자 (User equipment: UE)가 N_R 개의 RRH를 통해 1개의 BBU로 각각 독립적인 메시지를 전송한다. 각 UE와 RRH는 단일 안테나를 사용한다고 가정하며, 표기상 편의를 위해 집합 $\overline{N_U} = \{1, \dots, N_U\}$ 와 $\overline{N_R} = \{1, \dots, N_R\}$ 를 정의한다. 본 논문에서는 모든 UE와 RRH가 같은 주파수 대역에서 서로 간섭을 주고 받으며 통신하는 상황을 가정한다.

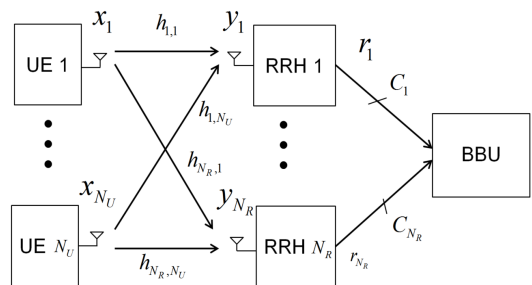


그림 1. C-RAN 상향링크 시스템 모델 설명
Fig. 1. Illustration of the uplink of a C-RAN system

2.1 상향링크 접속채널 (UE-RRH)

각 k 번째 UE(이하 UE k)는 자신의 메시지에 Gaussian 인코딩을 수행하여 송신 신호 $x_k \sim CN(0, P_k)$ 을 생성하고, 여기서 P_k 는 UE k 의 송신신호 전력을 나타낸다. 상향링크 채널을 통해 i 번째 RRH(이하 RRH i)가 수신하는 신호 y_i 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_i = \sum_{k \in \overline{N}_{U,i}} h_{i,k} x_k + z_i. \quad (1)$$

여기서 $h_{i,k}$ 는 UE k 와 RRH i 간의 채널 응답 계수를 나타내며, 한 코딩 구간의 송수신 기간동안 고정되었다고 가정한다. z_i 는 RRH i 의 안테나에 더해지는 잡음 신호를 나타내며, $z_i \sim CN(0, N_0)$ 의 분포를 따른다고 가정하고, N_0 는 잡음 신호 z_i 의 전력을 의미한다. 송신 신호들 $\{x_k\}_{k \in \overline{N}_U}$ 및 잡음 신호 z_i 간의 통계적 독립성을 이용하면, 수신 신호 y_i 의 전력 $E|y_i|^2$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$E|y_i|^2 = \sum_{k \in \overline{N}_U} g_{i,k} P_k + N_0. \quad (2)$$

여기서 $g_{i,k}$ 는 $g_{i,k} = |h_{i,k}|^2$ 로 정의된다.

2.2 프런트홀 링크 (RRH-BBU)

각 RRH i 와 BBU는 용량 C_i [bit/symbol]의 디지털 프런트홀 링크를 통해 연결되었다고 가정하며, 시간 단위 symbol은 상향링크 채널의 (시간 축에서의) 단일 심볼 구간을 의미한다. 본 논문에서는 제한된 용량의 프런트홀 링크를 갖추었을 때 기존 LTE 시스템 대비 C-RAN 시스템의 장단점을 확인하기 위해, 각 RRH i 가 근접 배치된 UE들의 메시지를 복호화한 후 BBU로 전달하는 decode-and-forward (DF) 중계 방식^[6]과 C-RAN 시스템에서와 같이 수신신호를 압축하여 전달하되 UE들의 메시지 복호화(decoding)는 BBU에서 중앙 집중적으로 처리되는 compress-and-forward (CF) 중계 방식^[7]을 비교한다.

III. DF 중계 기반의 기존 상향링크 시스템

기존 셀룰러 시스템에서는 각 기지국이 자신의 셀 영역에 존재하는 UE들의 메시지를 직접 복호화하여 결과적으로 얻는 추정 메시지들을 코어 네트워크로 전달하

는 역할을 수행한다. 이를 수학적으로 모델링하기 위해, 전체 UE 집합 \overline{N}_U 을 $\overline{N}_{U,1}, \dots, \overline{N}_{U,N_R}$ 로 분할하며, 각 부집합 $\overline{N}_{U,i}$ 는 다른 RRH들보다 RRH i 에 가장 가까이 위치한 UE들의 집합이다. 따라서 상기 집합들은 $\overline{N}_{U,1} \cup \dots \cup \overline{N}_{U,N_R} = \overline{N}_U$ 및 $\overline{N}_{U,i} \cap \overline{N}_{U,j} = \emptyset$ ($i \neq j$)의 조건을 만족시킨다. 그림 2는 $N_U = 4$, $N_R = 3$, $\overline{N}_{U,1} = \{3\}$, $\overline{N}_{U,2} = \{1,4\}$, $\overline{N}_{U,3} = \{2\}$ 의 예를 보여준다. 이러한 거리 기반 셀 association 시스템^[6]에서 RRH i 를 통해 통신하는 UE들 $\overline{N}_{U,i}$ 의 sum-rate 성능은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$R_{N_{U,i}}^{DF} = \min\{I(\{x_k\}_{k \in \overline{N}_{U,i}}; y_i), C_i\}. \quad (3)$$

여기서 $I(\{x_k\}_{k \in \overline{N}_{U,i}}; y_i)$ 는 RRH i 가 수신신호 y_i 신호를 이용하여 자기 영역 안에 속하는 UE들 $\overline{N}_{U,i}$ 의 송신신호인 $\{x_k\}_{k \in \overline{N}_{U,i}}$ 을 합동(joint) 복호화한 다는 가정 하에 획득 가능한 sum-rate을 정량화한 수치이며, 해당 메시지들이 제한된 용량 C_i 의 프런트홀 링크를 통해 BBU로 전달되어야 하기 때문에 추가 제한 요소 C_i 를 갖는다. 첫 번째 제한 요소인 상호정보량 $I(\{x_k\}_{k \in \overline{N}_{U,i}}; y_i)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} I(\{x_k\}_{k \in \overline{N}_{U,i}}; y_i) &= h(y_i) - h(y_i | \{x_k\}_{k \in \overline{N}_{U,i}}) \\ &= \log_2 \left(\sum_{j \in \overline{N}_R} \sum_{k \in \overline{N}_{U,j}} g_{i,k} x_k + N_0 \right) \\ &\quad - \log_2 \left(\sum_{j \in \overline{N}_R \setminus \{i\}} \sum_{k \in \overline{N}_{U,j}} g_{i,k} x_k + N_0 \right) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{k \in \overline{N}_{U,i}} g_{i,k} P_k}{\sum_{j \in \overline{N}_R \setminus \{i\}} \sum_{k \in \overline{N}_{U,j}} g_{i,k} x_k + N_0} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

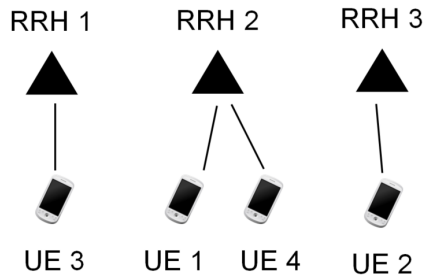


그림 2. 거리기반 셀 association의 예 ($N_U = 4$, $N_R = 3$, $\overline{N}_{U,1} = \{3\}$, $\overline{N}_{U,2} = \{1,4\}$, $\overline{N}_{U,3} = \{2\}$)
 Fig. 2. An example of the distance-based cell association with $N_U = 4$, $N_R = 3$, $\overline{N}_{U,1} = \{3\}$, $\overline{N}_{U,2} = \{1,4\}$, $\overline{N}_{U,3} = \{2\}$.

결과적으로 기지국(RRH)들이 DF 모드로 동작할 때의 전체 시스템 sum-rate은 $R_{sum}^{DF} = \sum_{i \in \overline{N}_k} R_{N_{C,i}}^{DF}$ 로 얻어진다.

IV. 점대점 프런트홀 압축 기술 기반의 CF 중계 기술을 적용한 C-RAN 상향링크 시스템

기존 셀룰러 상향링크 시스템과 달리, C-RAN 시스템의 RRH들은 수신신호를 이용한 UE 메시지들의 개별 복호화를 생략하고, 수신 신호에 가능한 적은 왜곡을 갖도록 양자화 및 압축 과정을 수행하여 BBU로 전달하며, BBU는 수신된 양자화 신호들을 활용하여 UE들의 송신 신호들에 대한 합동 복호화를 수행한다. 정보이론의 rate-distortion 이론 결과를 활용하기 위해, 본 논문에서는 양자화와 압축의 효과를 동시에 모델링하며, 따라서 양자화와 압축을 같은 의미로 사용한다^[8].

각 RRH i 가 생성하는 양자화 출력 신호 r_i 는 y_i 의 양자화 버전으로 볼 수 있으며, 수식적으로

$$r_i = y_i + q_i \tag{5}$$

와 같이 모델링할 수 있다. 여기서 q_i 는 양자화에 의해 발생된 왜곡인 양자화 잡음신호를 의미하며, 평균 0, 분산 Q_i 을 갖는다고 가정한다 (즉, Q_i 는 양자화 잡음신호의 평균 전력을 의미). 또한, 양자화 잡음 신호 q_i 는 양자화 코드북 생성 방식(샘플별 균일 양자화 방식^[12] 혹은 벡터 Gaussian 양자화 방식^[11,13,14])에 따라 다른 통계적 분포를 갖는다. IV-A절과 IV-B절에서 이 두 가지 방식에 대해 차례로 소개하고, 각 방식에서 양자화 잡음 신호 q_i 의 전력값 Q_i 가 만족시켜야 할 제한 조건을 관찰한다. 또한 본 절에서는 BBU가 서로 다른 RRH가 양자화한 신호들을 개별적으로 회복하는 점대점 프런트홀 압축 기술을 가정하고, 여러 양자화 신호들간의 관계를 고려하여 보다 지능적으로 회복하는 기술은 V절에서 다루도록 한다.

4.1 샘플별 균일 프런트홀 양자화

프런트홀 통신을 위해 여러 유명 산업체들 간의 동의한 표준적인 방식은 CPRI 기술이며^[5], 각 RRH i 가 자신의 수신 기저대역 샘플 y_i 에 샘플별 스칼라 양자화를 수행한다. 특히, 샘플별 균일 양자화를 수행하게 되면, 양자화 잡음 신호의 분산 Q_i 은 다음과 같이 유

도할 수 있다^[4].

$$Q_i = 6(E|y_i|^2)2^{-C_i}. \tag{6}$$

샘플 별 균일 양자화 방식은 구현이 매우 간단하다는 장점이 있으나, 프런트홀 용량이 작은 환경에서는 잡음 신호의 전력을 충분히 낮출 수 없으므로, 전체적인 시스템 용량의 성능에 큰 손실을 가져다 줌으로써 간섭 제어의 의미를 감퇴시키는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 시간 축의 여러 샘플들을 모아서 벡터 양자화를 적용함으로써 더 낮은 전력의 양자화 잡음 신호를 생성할 수 있다. 이러한 방식을 IV-B절에서 다루도록 한다.

4.2 벡터 가우시안 프런트홀 양자화

샘플별 양자화 문제점을 해결하기 위해, 시간 축의 여러 개의 샘플들을 동시에 양자화하는 벡터 양자화 방식을 통해 성능 향상을 얻을 수 있다. 양자화되는 샘플 수가 충분히 크면, 벡터 양자화의 효과를 다음의 테스트 채널 $p(r_i|y_i)$ 로 모델링할 수 있다. 즉, 양자화 전략의 최적화는 테스트 채널 $p(r_i|y_i)$ 의 최적화와 동등하고, $p(r_i|y_i)$ 가 만족시켜야 할 조건은 다음과 같다^[15].

$$p(r_i|y_i): I(y_i;r_i) \leq C_i. \tag{7}$$

테스트 채널 $p(r_i|y_i)$ 의 일반적인 최적화는 그 복잡도가 매우 높으므로, 본 논문에서는 양자화 잡음 신호가 $q_i \sim CN(0, Q_i)$ 의 분포를 따르는 Gaussian 테스트 채널을 고려한다^[11,13,14]. 그러면 (7)의 상호정보량 $I(r_i;y_i)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} I(y_i;r_i) &= h(r_i) - h(r_i|y_i) \\ &= \log_2(\pi e(E|y_i|_2^2 + Q_i)) - \log_2(\pi e Q_i) \\ &= \log_2\left(1 + \frac{E|y_i|^2}{Q_i}\right). \end{aligned}$$

결과적으로 (7)을 만족시키면서 최소의 값을 갖는 양자화 잡음신호의 전력 Q_i 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$Q_i = E|y_i|^2 / (2^{C_i} - 1). \tag{8}$$

식 (6)의 균일분포 양자화 기반의 양자화 잡음 전력 비교했을 때, 벡터 양자화를 통해 얻는 식 (8)의 양자화 잡음 전력이 더 낮은 것을 확인할 수 있다.

4.3 Sum-rate 성능

BBU는 프런트홀 링크를 통해 RRH들로부터 수신한 양자화 결과물 $\{r_i\}_{i \in N_R}$ 를 활용하여, UE들의 송신 신호 $\{x_k\}_{k \in N_{U,i}}$ 을 합동(joint) 복호화한다고 가정하면, 해당 시스템에서 얻을 수 있는 전체 sum-rate 성능은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 R_{sum}^{CF} &= I(\{x_k\}_{k \in N_{U,i}}; \{r_i\}_{i \in N_R}) \\
 &= h(\{r_i\}_{i \in N_R}) - h(\{r_i\}_{i \in N_R} | \{x_k\}_{k \in N_{U,i}}) \\
 &= \log_2 \det \left(\pi e \begin{pmatrix} H \text{diag}(\{P_k\}_{k \in N_{U,i}}) H^H \\ + \text{diag}(\{Q_i\}_{i \in N_R}) + N_0 I \end{pmatrix} \right) \\
 &\quad - \log_2 \det \left(\pi e (\text{diag}(\{Q_i\}_{i \in N_R}) + N_0 I) \right) \\
 &= \psi \left(\begin{matrix} H \text{diag}(\{P_k\}_{k \in N_{U,i}}) H^H, \\ \text{diag}(\{Q_i\}_{i \in N_R}) + N_0 I \end{matrix} \right). \tag{9}
 \end{aligned}$$

여기서 전체 채널 행렬 H 와 함수 $\psi(A, B)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,N_U} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,N_U} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \dots & h_{N_R,N_U} \end{bmatrix}, \tag{10}$$

$$\psi(A, B) = \log_2 \det(A + B) - \log_2 \det(B). \tag{11}$$

식 (9)에서는 양자화 잡음 신호가 $q_i \sim CN(0, Q_i)$ 의 가우시안 분포를 따른다고 가정했으나, 이는 샘플 별 균일 양자화에는 적용되지 않을 수 있다. 그러나 균일 양자화 적용의 경우, 양자화 잡음 신호의 통계적 분포의 정확한 유도가 어려운 반면, 적어도 최악의 잡음 신호인 가우시안 잡음 신호를 가진 경우보다는 좋은 성능을 내기 때문에, 본 논문에서는 양자화 잡음 신호도 가우시안 분포를 따른다고 가정한다.

V. 분산 프런트홀 압축 기술 기반의 CF 중계 기술을 적용한 C-RAN 상향링크 시스템

이 절에서는 점대점 프런트홀 압축 기술에 초점을 맞춘 IV절과 달리, BBU가 여러 RRH들이 보낸 양자

화 결과 신호들 간의 통계적 상관도를 고려하여 보다 효율적으로 회복하는 분산 프런트홀 압축 기술을 기술한다. 전체 양자화 신호들 $\{r_i\}_{i \in N_R}$ 을 합동(joint) 회복하는 방법이 최적이나, 그 경우 양자화 잡음 전력 변수들 $\{Q_i\}_{i \in N_R}$ 이 만족시켜야 할 제한 조건의 개수가 2^{N_R} 에 비례하므로^[15], 그 분석이 매우 복잡해지는 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 복잡도 해결을 위해 BBU가 $\{r_i\}_{i \in N_R}$ 들을 $r_{\pi(1)} \rightarrow r_{\pi(2)} \rightarrow \dots \rightarrow r_{\pi(N_R)}$ 의 순서로 순차적인 회복 과정을 수행한다고 가정한다.

여기서 $\pi: \overline{N_R} \rightarrow \overline{N_R}$ 는 인덱스 집합 $\overline{N_R}$ 의 임의의 순열을 나타내며, 최적화대상에 포함된다. 그림 3은 $N_R = 3$ 인 경우에 얻을 수 있는 RRH들의 $3! = 6$ 가지 순열을 π 함수를 이용해 표현한 예를 보여준다.

상기 기술한 것과 같이, BBU가 $r_{\pi(1)} \rightarrow r_{\pi(2)} \rightarrow \dots \rightarrow r_{\pi(N_R)}$ 의 순서로 양자화 신호들을 회복하게 되면, 각 양자화 잡음 전력 $Q_{\pi(i)}$ 의 제한 조건은 다음과 같이 기술된다^[2].

$$Q_{\pi(i)} : I(y_{\pi(i)}; r_{\pi(i)} | r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}) \leq C_{\pi(i)}. \tag{12}$$

조건식 (12)는 BBU가 $r_{\pi(i)}$ 을 회복할 시에 이전에 복호화된 신호들인 $r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}$ 을 부가정보(side information)로 활용한다는 것을 의미하며, (7)의 조건보다 완화된 조건이다. 특히 서로 다른 RRH들의 수신 신호들 간의 통계적 상관도가 클수록, 완화되는 정도가 커진다. (12)의 조건부 상호정보량 $I(y_{\pi(i)}; r_{\pi(i)} | r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)})$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

순서	함수 π 를 이용한 표현
1 → 2 → 3 :	$\pi(1) = 1, \pi(2) = 2, \pi(3) = 3$
1 → 3 → 2 :	$\pi(1) = 1, \pi(2) = 3, \pi(3) = 2$
2 → 1 → 3 :	$\pi(1) = 2, \pi(2) = 1, \pi(3) = 3$
2 → 3 → 1 :	$\pi(1) = 2, \pi(2) = 3, \pi(3) = 1$
3 → 1 → 2 :	$\pi(1) = 3, \pi(2) = 1, \pi(3) = 2$
3 → 2 → 1 :	$\pi(1) = 3, \pi(2) = 2, \pi(3) = 1$

그림 3. 함수 π 를 이용한 RRH들의 순서 표현 ($N_R = 3$)
 Fig. 3. Representation of the RRHs' orders with the function π ($N_R = 3$)

$$\begin{aligned}
 & \mathcal{I}(y_{\pi(i)}; r_{\pi(i)} | r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}) \\
 &= h(r_{\pi(i)} | r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}) - h(r_{\pi(i)} | y_{\pi(i)}, r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}) \\
 &= \log_2(\pi e (E[|y_{\pi(i)}|^2 | r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}] + Q_i)) \\
 &\quad - \log_2(\pi e Q_i) \\
 &= \log_2 \left(1 + \frac{E[|y_{\pi(i)}|^2 | r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}]}{Q_i} \right).
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \max_{\pi} \psi \left(\begin{matrix} H \text{diag}(\{P_k\}_{k \in \overline{N_U}}) H^H \\ \text{diag}(\{Q_i\}_{i \in \overline{N_R}}) + N_0 I \end{matrix} \right) \\
 & \text{s.t. } Q_{\pi(i)} \text{ given as (13)} \quad \forall i \in \overline{N_R}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

따라서 (12)을 만족시키면서 최소의 값을 갖는 잡음 전력 $Q_{\pi(i)}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{\pi(i)} = E[|y_{\pi(i)}|^2 | r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}] / (2^{C_i} - 1). \tag{13}$$

여기서 조건부 분산 $E[|y_{\pi(i)}|^2 | r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}]$ 는 $r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}$ 를 안다는 전체 하에서의 $y_{\pi(i)}$ 의 분산 값을 의미하며, 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 & E[|y_{\pi(i)}|^2 | r_{\pi(1)}, \dots, r_{\pi(i-1)}] \\
 &= E[|y_{\pi(i)}|^2] - E[y_{\pi(i)}^H r_{\pi(i-1)}^H] E[r_{\pi(i-1)}^H r_{\pi(i-1)}]^{-1} \\
 &\quad \times E[r_{\pi(i-1)}^H y_{\pi(i)}] \\
 &= h_{\pi(i)}^H \text{diag}(\{P\}_{k \in \overline{N_U}}) h_{\pi(i)} + N_0 \\
 &\quad - h_{\pi(i)}^H H_{\pi(i-1)}^H \left(\begin{matrix} H_{\pi(i-1)} \{P\}_{k \in \overline{N_U}} H_{\pi(i-1)}^H \\ + \text{diag}(\{Q_{\pi(j)} + N_0\}_{j=1}^{i-1}) \end{matrix} \right)^{-1} \\
 &\quad \times H_{\pi(i-1)} h_{\pi(i)}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 $r_{\pi(i-1)}$, $h_{\pi(i)}$, $H_{\pi(i-1)}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 r_{\pi(i-1)} &= [r_{\pi(1)} \ r_{\pi(2)} \ \dots \ r_{\pi(i-1)}]^T, \\
 h_{\pi(i)} &= [h_{\pi(i),1} \ h_{\pi(i),2} \ \dots \ h_{\pi(i),N_U}], \\
 H_{\pi(i-1)} &= \begin{bmatrix} h_{\pi(i-1)}^H \\ \vdots \\ h_{\pi(i-1)}^H \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

분산 프런트홀 압축 기술을 통해 얻은 양자화 잡음 전력 (13)의 $Q_{\pi(i)}$ 는 점대점 프런트홀 압축 기술로부터 얻은 전력 (9)의 Q_i 보다 작은 값을 가지므로, 전체 시스템 용량 측면에서 향상된 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 BBU에서의 $\{r_i\}_{i \in \overline{N_R}}$ 들의 최후 순서를 결정하는 함수 π 의 설정에 따라, 양자화 잡음의 감소 정도에 차이가 발생하므로, 양자화 순서를 최적화하는 문제를 다음과 같이 고려할 수 있다.

상기 문제 (16)의 최적해를 완결 탐색 방식으로 찾기 위해서는 $N_R \times (N_R - 1) \dots \times 1$ 개의 후보 순열에 대한 sum-rate 계산이 필요하기 때문에 계산 복잡도가 매우 높아진다. 이를 해결하기 위해 [14]에서 $N_R(N_R + 1)/2$ 회의 헛수를 필요로 하는 부최적 검색 방식이 제안되었으나, 본 논문에서는 이론적인 성능 비교를 위해 완결 탐색 방식을 고려한다.

VI. 압축복호화 및 채널복호화 합동 수행을 적용한 CF중계 C-RAN 상향링크 시스템

앞선 두 절(IV절, V절)에서는 C-RAN 시스템의 장점을 활용하기 위해 RRH에서의 CF 중계 기술을 가정하였으나, BBU에서 압축신호의 복호화(즉, decompression)과 UE들이 보낸 신호의 채널 복호화가 개별적으로 수행된다고 가정하였다. 그러나 이러한 개별 동작은 구현에 용이하나, 이론적인 성능 측면에서 손실을 일으킬 수 있다. 이에 본 절에서는 BBU가 압축신호의 복호화와 UE 신호의 채널 복호화를 합동적으로 수행한다는 전체 하에서의 sum-rate 성능을 관찰한다. 이를 위해 [17]에서 연구된 최적화 기술을 적용한다.

수식 (5)의 프런트홀 양자화 모델과 IV-B절의 벡터 가우시안 양자화를 가정하고, BBU에서 압축 및 채널 복호화의 합동 수행을 가정하면, 고정된 양자화 잡음 전력 $\{Q_i\}_{i \in \overline{N_R}}$ 에 대해 우리가 얻을 수 있는 sum-rate 성능은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R^{JDD} = \min_{S \subseteq \overline{N_R}} \left\{ \sum_{j \in S} (C_j - \mathcal{I}(y_j; r_j | x)) + \mathcal{I}(x; r_{S^c}) \right\}$$

상기 sum-rate 수식을 양자화 잡음 전력 $\{Q_i\}_{i \in \overline{N_R}}$ 의 함수로 표현하게 되면 비 convex 함수의 꼴을 갖게 되나^[17], 다행히 convex 함수들의 차로 정리할 수 있기 때문에, concave convex procedure (CCCP) 기반의 반복적 최적화 알고리즘 적용을 통해 부 최적해를 효율적으로 얻을 수 있다^[18].

VII. 모의 실험 결과

500m×500m의 정사각형 형태의 영역에 RRH들과 UE들의 위치가 랜덤하게 배치되는 환경을 고려한다. 해당 노드들의 위치가 정해지면, 채널 계수 $h_{i,k}$ 는 $h_{i,k} = \sqrt{1/(1+(D_{i,k}/80)^3)} \tilde{h}_{i,k}$ 로 주어지고, $D_{i,k}$ 는 RRH i 와 UE k 간의 거리를 가리키며, 소규모 페이딩을 나타내는 $\tilde{h}_{i,k}$ 는 $\tilde{h}_{i,k} \sim CN(0,1)$ 의 분포를 갖는다고 가정한다.

비교를 위해 이론적인 한계치를 제시해 주는 cut-set 상한 성능도 함께 보여준다³⁾. 채널 계수들, 신호대잡음비 (SNR), 프런트홀 용량이 주어지며, cut-set 상한은 다음 수식과 같이 계산할 수 있다.

$$R_{cut} = \min_{S \subseteq \overline{N}_R} \left\{ \Psi \left(\begin{matrix} H_S \text{diag}(\{P_k\}_{k \in \overline{N}_U}) H_S^H \\ \text{diag}(\{Q_i\}_{i \in S}) + N_0 I \\ + \sum_{i \in S} C_i \end{matrix} \right) \right\}$$

여기서 H_S 는 H 의 부행렬이며, 집합 S 의 인덱스에 있는 행들로 채워진다.

그림 4는 $N_U = N_R = 4$ 및 20 dB SNR인 C-RAN 상황링크 시스템에서의 평균 sum-rate 성능을 프런트홀 용량 C_i 의 변화에 따라 관찰한 그래프이다. SNR이 고정되어 있는 상황에서 프런트홀 용량을 계속해서 증가시킬 경우 CF중계 기반의 C-RAN 시스템들을 cut-set 상한에 수렴하는 성능을 획득하는 것으로 관찰된다. 즉, 충분히 안정된 프런트홀 링크만 뒷받침되면, C-RAN 시스템은 효율적인 간섭제어를 통해 최적

의 성능을 획득하는 것을 알 수 있다. 반면 DF 중계 기반의 단일 셀 기반 시스템은 간섭 제한 효과로 인해 프런트홀 용량이 충분히 크더라도 제한된 sum-rate 성능을 획득하는 것으로 보인다. 프런트홀 용량이 제한될 경우 분산 프런트홀 압축 기술은 점대점 압축 기술에 비해 상당히 향상된 성능을 획득하는 것이 관찰되며, BBU에서의 회복 순서를 최적화하면 추가적인 이득을 얻는 것이 확인된다. 그림 4에서 얻을 수 있는 중요한 결론은 간섭 제어를 위해 C-RAN 시스템을 적용할 때 CPRI와 같이 구현이 용이한 샘플별 균일 양자화 방식을 적용하면, 프런트홀 용량이 충분한 경우에만 DF 중계 기반의 단일 셀 신호처리 기술보다 향상된 성능을 얻을 수 있다는 것이다. 마지막으로 BBU에서 압축과 채널 복호화를 합동적으로 수행하는 기술의 성능을 관찰하면, 순서가 최적화된 분산 프런트홀 압축 기술에 비해 매우 작은 성능 이득을 획득하는 것을 알 수 있다. 즉, 압축 복호화와 채널 복호화 과정을 순차적으로 수행하더라도, 압축 복호화의 순서를 최적화할 수 있으면 합동 복호화의 성능에 매우 근접한 성능을 얻을 수 있음을 의미한다.

그림 5는 $N_U = N_R = 4$ 및 $C_i = 2$ bit/symbol인 C-RAN 상황링크 시스템에서의 평균 sum-rate 성능을 신호대잡음비(SNR)의 변화에 따라 관찰할 그래프이다. 그림으로부터 가우시안 타입의 프런트홀 압축 기술은 대부분의 SNR 영역에서 DF 기반의 셀룰러 시스템보다 높은 sum-rate 성능을 보이고 있으나, 샘플별 균일 양자화 기술을 적용할 경우에는 오히려 기존 셀룰러 시스템보다 열화된 sum-rate 성능을 보이는

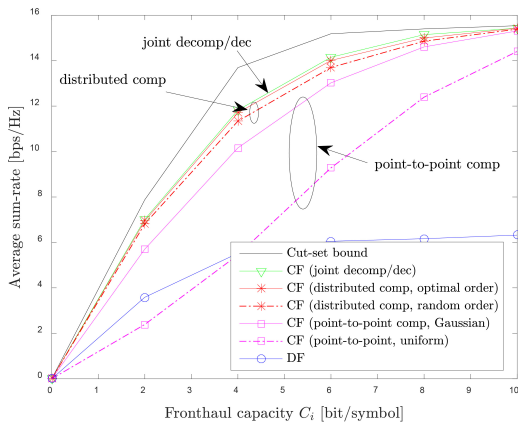


그림 4. C-RAN 상황링크 시스템에서 프런트홀 용량에 따른 평균 sum-rate 성능 영향 비교
Fig. 4. Average sum-rate versus the fronthaul capacity for a C-RAN uplink system

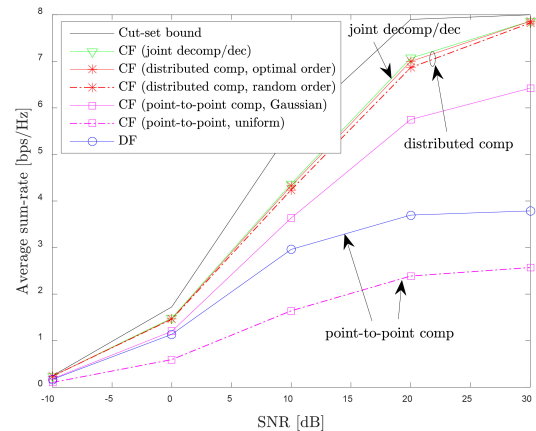


그림 5. C-RAN 상황링크 시스템에서 신호대잡음비에 따른 평균 sum-rate 성능 영향 비교
Fig. 5. Average sum-rate versus the SNR for a C-RAN uplink system

것을 확인할 수 있다. 그림 4에서의 결론과 마찬가지로, 프런트홀 용량이 충분하지 않을 경우에는 백터 양자화 기반의 고급 프런트홀 압축 기술을 적용해야 간섭 제어 효과에 의해 기존의 DF 기반 중계 기술보다 향상된 성능을 획득할 수 있다. 또한 SNR이 높을수록 전체 시스템 성능이 프런트홀 용량에 의해 결정되기 때문에, 점대점 프런트홀 압축 기술 대비 분산 프런트홀 압축 기술의 성능 이득이 더 두드러지는 것이 확인된다. 그림 4에서와 마찬가지로 압축 복호화 순서가 최적화된 분산 프런트홀 압축 기술 대비 합동 압축/채널 복호화 기술의 성능 이득은 크지 않은 것으로 관찰된다.

마지막으로 그림 6은 $C_i = 2$ bit/symbol 및 5 dB SNR인 C-RAN 상향링크 시스템에서의 평균 sum-rate 성능을 UE 및 RRH 개수인 $N_U = N_R$ 변화에 따라 관찰할 그래프이다. 이전 그림들과 달리 흥미로운 점은 $N_U = N_R$ 가 작은 경우에는 간섭 신호의 개수가 많지 않기 때문에 기존의 DF 기반 중계 기술이 CF 기반의 C-RAN 상향링크 시스템들과 비슷하거나 더 좋은 성능을 획득하는 것이 관찰된다. 그러나 $N_U = N_R$ 가 커질수록 간섭 신호가 많아져서 CF 기반의 C-RAN 상향링크 시스템이 간섭 제어 효과에 의해 더 향상된 성능을 보인다. 그러나 앞의 그림들과 마찬가지로 프런트홀 용량이 충분하지 크지 않기 때문에, 샘플별 균일 양자화 방식을 적용할 경우 DF 기반의 단일 셀 기반 방식보다도 열화된 성능을 얻게 된다. 마지막으로 압축 및 채널 복호화의 합동 수행에 의한 성능 이득이 RRH와 UE의 개수가 많아질수록

더 현저해지는 것이 관찰된다.

VIII. 결 론

본 논문에서는 C-RAN 상향링크 시스템을 위한 다양한 CF 기반의 중계 기술의 성능을 분석 및 관찰하였다. 우선 기존 셀룰러 시스템과 같이 DF 중계 기반의 단일 셀 상향링크 시스템 관찰을 고려하여, 각 기지국에서의 복호화가 인접 셀 UE들의 송신 신호로부터의 간섭으로 인해 열화됨을 관찰하였다. 이를 해결하기 위해 각 RRH가 수신신호를 BBU로 전달하여 BBU에서 합동 복호화하는 C-RAN 시스템을 관찰하였고, 정보이론의 소스코딩 결과를 활용하는 다양한 프런트홀 압축 기술(샘플별 균일 양자화, 점대점 및 분산 프런트홀 압축 기술)의 효과를 분석 및 관찰하였다. 특히 분산 프런트홀 압축 기술의 경우 복호화 순서에 따라 성능이 다르게 나타나기 때문에, 복호화 순서 최적화에 의한 성능 이득도 관찰하였다. 다양한 실험 환경에서의 모의실험을 통해 여러 DF 및 CF 중계 기반 상향링크 시스템의 성능을 비교 및 분석하였고, 이론적 한계치인 cut-set 상한선에 근접하는 경우도 관찰하였다. 특히, 20dB의 SNR과 $N_R = N_U = 4$, 프런트홀 용량이 4 bit/symbol의 환경에서 간단한 샘플별 양자화 기술을 적용하면 기존의 DF 기반의 셀룰러 시스템 대비 성능 이득이 0%이나, 순서가 최적화된 분산 프런트홀 압축이나 합동 압축/채널 복호화 기술을 적용할 경우 약 110%의 성능 이득을 획득하는 것으로 관찰된다. 중요한 향후 연구 주제로 각 RRH에서 CF와 DF를 선택적으로 사용하는 하이브리드 중계 방식을 사용하는 시스템^[19]과 여러 OFDM subcarrier에 걸쳐서 프런트홀 링크 용량 할당을 최적화하여 사용하는 자원관리 기술^[20] 등에 대한 연구도 의미 있을 것으로 기대된다. 또한 상향링크-하향링크 간의 이원성을 활용한 C-RAN 하향링크 성능 분석도 요구된다^[21].

References

[1] W. Roh, J.-Y. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, J. Cho, K. Cheun, and F. Aryanfar, "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp.

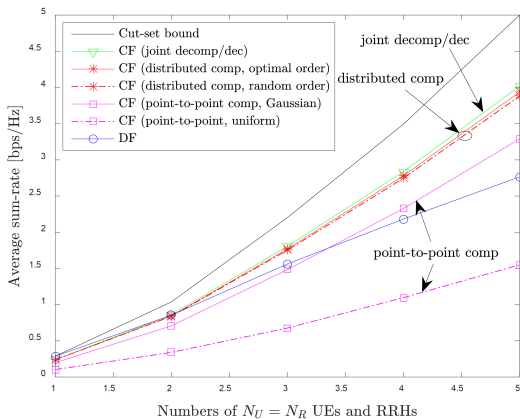


그림 6. C-RAN 상향링크 시스템에서 UE 및 RRH 개수에 따른 평균 sum-rate 성능 영향 비교
Fig. 6. Average sum-rate versus the numbers of UEs and RRHs for a C-RAN uplink system

- 106-113, Feb. 2014.
- [2] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, and A. V. Vasilakos, "A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: Opportunities and challenges," *Wireless Networks*, vol. 21, no. 8, pp. 2657-2676, Nov. 2015.
- [3] Y. Han and J. Lee, "Compressed sensing techniques for millimeter wave channel estimation," *J. KICS*, vol. 42, no. 1, pp. 25-30, Jan. 2017.
- [4] S. Kim, K. Kim, and E.-K. Hong, "Analysis on interference control in heterogeneous networks," *J. KICS*, vol. 38, no. 3, pp. 268-276, Mar. 2013.
- [5] N. Zhao, X. Liu, F. R. Yu, M. Li, and V. C. M. Leung, "Communications, caching, and computing oriented small cell networks with interference alignment," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 9, pp. 29-35, Sept. 2016.
- [6] S. Park, T.-S. Lee, and S.-U. Park, "Overview and recent trends of cloud radio access networks," *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 30, no. 9, pp. 78-84, 2013.
- [7] H.-S. Kim and S.-J. Maeng, "On benefits, challenges and development prospects of C-RAN," *KICS Inf. and Commun. Mag.*, vol. 31, no. 3, pp. 79-84, Feb. 2014.
- [8] S.-H. Park, O. Simeone, O. Sahin, and S. Shamai, "Fronthaul compression for cloud radio access networks: signal processing advances inspired by network information theory," *IEEE Sig. Proc. Mag.*, vol. 31, no. 6, pp. 69-79, Nov. 2014.
- [9] O. Simeone, A. Maeder, M. Peng, O. Sahin, and W. Yu, "Cloud radio access network: Virtualizing wireless access for dense heterogeneous systems," *J. Commun. Netw.*, vol. 18, no. 2, pp. 135-149, Apr. 2016.
- [10] Ericsson AB, Huawei Technologies, NEC Corporation, Alcatel Lucent and Nokia Siemens, *Common public radio interface (CPRI): interface specification*, CPRI specification v5.0, Sept. 2011.
- [11] J. Hoydis, M. Kobayashi, and M. Debbah, "Optimal channel training in uplink network MIMO systems," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 59, no. 6, pp. 2824-2833, Jun. 2011.
- [12] L. Liu and R. Zhang, "Optimized uplink transmission in multi-antenna C-RAN with spatial compression and forward," *IEEE Trans. Sig. Proc.*, vol. 63, no. 19, pp. 5083-5095, Oct. 2015.
- [13] A. del Coso and S. Simoens, "Distributed compression for MIMO coordinated networks with a backhaul constraint," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 9, pp. 4698-4709, Sept. 2009.
- [14] S.-H. Park, O. Simeone, O. Sahin, and S. Shamai, "Robust and efficient distributed compression for cloud radio access networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 2, pp. 692-703, Feb. 2013.
- [15] A. E. Gamal and Y.-H. Kim, *Network Information Theory*, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2011.
- [16] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, M. Al-Shalash, C. Caramanis, and J. G. Andrews, "User association for load balancing in heterogeneous cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 6, pp. 2706-2716, Jun. 2013.
- [17] S.-H. Park, O. Simeone, O. Sahin, and S. Shamai (Shitz), "Joint decompression and decoding for cloud radio access networks," *IEEE Sign. Processing Lett.*, vol. 20, no. 5, pp. 503-506, May 2013.
- [18] M. Tao, E. Chen, H. Zhou, and W. Yu, "Content-centric sparse multicast beamforming for cache-enabled cloud RAN," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 9, pp. 6118-6131, Sept. 2016.
- [19] R. G. Stephen and R. Zhang, "Fronthaul-constrained uplink OFDM in C-RAN with hybrid decoding," in *Proc. IEEE Globecom*, Washington D.C., Dec. 2016.
- [20] R. G. Stephen and R. Zhang, "Joint millimeter-wave fronthaul and OFDMA resource allocation in ultra-dense CRAN," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 3, pp.

1411-1423, Mar. 2017.

- [21] L. Liu, P. Patil, and W. Yu, "An uplink-downlink duality for cloud radio access network," in *Proc. IEEE ISIT*, Barcelona, Spain, Jul. 2016.

유 대 성 (Daeseong Yu)



2012년 3월~현재 : 전북대학교
전자공학부 학사과정
<관심분야> 통신이론, 정보이론, 최적화 이론, 무선통신공학

이 진 우 (Jinwoo Lee)



2012년 3월~현재 : 전북대학교
전자공학부 학사과정
<관심분야> 통신이론, 정보이론, 최적화 이론, 무선통신공학

김 준 범 (Junbeom Kim)



2014년 3월~현재 : 전북대학교
전자공학부 학사과정
<관심분야> 통신이론, 정보이론, 최적화 이론, 머신러닝, 무선통신공학

박 석 환 (Seok-Hwan Park)



2005년 2월 : 고려대학교 전기
전자전파공학부 학사
2011년 2월 : 고려대학교 전자
전기공학과 박사
2015년 4월~현재 : 전북대학교
전자공학부 조교수

<관심분야> 무선통신, 네트워크 정보이론, 최적화 이론, 신호처리