

C-RAN 기반의 실내 환경에서 Cell-Split 기법과 Cell-Free 기법의 성능 분석

권도일, 김덕경*
인하대학교

22151095@inha.edu, *kdk@inha.ac.kr

Performance Analysis of Cell-Split and Cell-Free schemes in a C-RAN based Indoor Environment

Doyle Kwon, Duk Kyung Kim*
Inha University

요 약

본 논문에서는 실내 환경에서 두 가지 형태의 C-RAN 운용 방안의 성능을 비교, 분석한다. Cell-Split (CS) 기법은 distributed unit (DU)가 remote unit (RU)를 마치 하나의 스몰셀 기지국처럼 동작하도록 제어하는 것인 반면 Cell-Free (CF) 기법은 DU가 모든 RU를 일괄적으로 제어함으로써 단말들이 모든 RU로부터 서비스를 받는 것이다. 인도어 핫스팟 시나리오와 WINNER2 Large Indoor Hall 채널모델을 고려하였고 Sounding reference signal (SRS)를 통해 채널 추정이 이뤄지는 시스템을 가정하였다. CF 기법이 CS보다 간섭 처리 능력이 우수하여 더 좋은 성능을 보이며, 채널 추정 정확도가 증가할수록 두 기법간 성능 격차가 심화되는 것을 보인다.

I. 서론

5G 네트워크에서 실내 모바일 트래픽은 전체 모바일 트래픽의 80%를 차지할 것으로 예상되며 AR/VR 및 4K/8K 비디오 스트리밍과 같이 높은 수준의 데이터 전송률을 보장해야 하는 서비스들은 주로 실내에서 제공될 것으로 예측된다 [1]. 따라서 이동통신 사업자는 실내 셀 용량을 증대 시키고 동시에 단말의 서비스 품질을 향상시킬 수 있는 인도어 솔루션을 개발해야 한다. 인도어 솔루션의 핵심 요구사항은 크게 세 가지를 들 수 있다. 첫 번째는 셀당 스펙트럼 효율과 주파수 효율을 향상시켜 셀 용량을 증대시켜야 한다. 두 번째는 심리스 커버리지를 제공하고 단말에게 일정 수준의 링크 품질을 제공할 것을 보장하는 것이다. 마지막으로, 인빌딩 기지국 운용에 대한 비용을 최소화 하는 것이다.

셀 용량을 증대시키고 동시에 유비쿼터스 (ubiquitous) 커버리지를 제공하기 위해선 많은 수의 기지국들을 밀집히 배치하여 운용해야 하지만 이는 기지국 운용에 드는 CAPEX와 OPEX를 증가시킨다. 뿐만 아니라 기지국의 전력 소모에 따른 이산화탄소 배출로 인한 환경 오염 문제 등이 야기된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Cloud radio access network (C-RAN)이 제안되었다. 이 기술은 기지국의 기능을 baseband 프로세싱을 담당하는 BBU (baseband unit)와 RF 프로세싱을 담당하는 RRH (remote radio head)로 분리하는 종래 distributed RAN (D-RAN)을 발전시킨 것으로, D-RAN과 달리 NFV (network function virtualization)과 SDR (software define radio) 기술을 활용하여 BBU pool의 하드웨어 능력을 RRH들이 공유할 수 있다. 다수의 BBU들은 같은 장소에서 관리되고 저렴한 RRH들만 필요한 곳에 설치함으로써 O&M 비용 절감 효과와 DAS (distributed antenna system)를 통한 커버리지 확장 효과를 얻을 수 있다. 또한, BBU는 각 RRH가 마치 하나의 소형셀 기지국처럼 동작할 수 있도록 제어할 수 있다. 이 경우, 모든 RRH는 동일 주파수 자원을 재사용하기 때문에 소위 cell-splitting (CS) 기법을 실현할 수 있고 셀당 스펙트럼 효율을 향상시킬 수 있다.

BBU는 디지털화를 거쳐 얻은 I/Q 신호를 프론트홀을 통해 RRH에게 전달한다. 주목할 점은, 프론트홀의 요구 비트 전송률은 무선 망 대역폭에 비례한 샘플링률, 안테나 수 등에 의해 결정되며 프론트홀의 부하는 매우 높다는 점이다. 5G 에션 안테나 수와 대역폭이 크게 증가하기 때문에 프론트홀의 과부하 문제는 더욱 심화될 것이다. 이 문제를 해결하기 위한 대표적 기술은 BBU와 RRH간의 기능이 분리되는 단계를 상향 조정시키는 functional split 기술이다 [2, 3]. 3GPP는 총 8가지 functional split 옵션을 제안하였고, 옵션에 따라 RRH는 MAC과 PHY의 기능 중 일부 또는 전체를 수행할 수 있다 [2, 3]. 최

근 5G의 다양한 응용별로 유연하게 5G RAN을 구축하기 위해 BBU-RRH의 2단 분리가 아닌 CU-DU-RU의 3단으로 분리하는 구조가 많은 관심을 받고 있다. 이 경우, CU-DU의 기능 분리는 PDCP/RLC 층에서 이뤄지고, DU-RU 기능 분리는 PHY 층에서 이뤄진다. 특히 옵션에 따라, RU는 PHY 기능의 일부 또는 전체를 수행할 수 있게 되며 기능 분리 경계가 높은 PHY 단에서 이뤄질수록 프론트홀의 부하는 감소한다. 한편, 프론트홀 인터페이스를 아날로그 기반의 통신 기법을 통해 구현하려는 연구가 analog radio-over-fiber (A-ROF)란 명칭하에 활발히 진행 중이다 [4]. A-ROF를 적용하면 디지털 변환을 수행하지 않기 때문에 프론트홀의 요구 데이터 전송률이 크게 낮출 수 있고 프론트홀 성능을 향상시킬 수 있다.

진보된 프론트홀 성능에 기반하여 DU가 지리적으로 분산된 RU들을 일괄적으로 제어함으로써 네트워크 성능을 향상시키려는 C-RAN 기술이 연구되고 있다. 특히, RU간 분산 배치된 특성으로 인해 송/수신단 사이의 채널 상관 관계가 낮아지기 때문에 multi-user multiple-input multiple-output (MU-MIMO)이 single-user MIMO보다 주파수 효율 측면에서 유리하고 따라서 MU-MIMO 전송기법이 주로 사용된다. 이 경우, CS 기법과 달리, 단말들은 MU-MIMO 기법을 통해 모든 RU로부터 동시에 서비스를 받을 수 있다. 이는 셀 경계가 사라지는 것을 의미하기 때문에 이러한 C-RAN 기술을 Cell-Free (CF) 기법이라 한다. CS 경우, 각 RU가 독립적인 소형셀처럼 동작하기 때문에 단말들은 셀간 간섭에 노출될 수 있다는 반면, CF 기법의 경우 모든 단말들의 간섭을 MU-MIMO 프리코딩을 통해 처리할 수 있다는 장점이 있다. 한 가지 주목할 점은 프리코딩은 추정 채널에 기반하여 산출되기 때문에 만족스러운 성능을 얻기 위해서는 채널 추정 정확도가 높아야 한다는 점이다. 하지만, RU들은 분산 배치되어 있기 때문에 일부 RU들과 단말들간의 거리는 멀어질 수 있고, 그에 따른 상이 링크들에 대한 부정확한 채널 추정으로 인해 CF 기법의 성능이 하락할 수 있다. 본 논문에서는 DU의 기능 차이에 따른 두 기법의 MU-MIMO 프로세싱 차이와 채널 추정 정확도에 따른 성능 차이를 보인다. 본 논문의 기여도는 다음과 같다.

- 종래 대부분의 연구들은 DU와 단말간의 채널을 단순히 iid (independent and identically distributed) Rayleigh fading이라 가정하는 반면 본 논문에선 WINNER2 Indoor Channel Model을 적용한다.
- 완벽한 채널 정보를 가정하는 대부분의 종래 연구와 달리 SRS (sounding reference signal) 송/수신을 통해 채널 추정이 이뤄지는 경우를 가정한다. SRS SNR 조작을 통해 채널 추정 정확도와 CS 및 CF 기법의 성능 관계를 분석한다.

II. 본론

실내 핫스팟 시나리오를 고려한다. 그림 1 과 같이 K 개의 RU 는 서로간 동일한 간격을 둔 채 천장에 배치 되어 있고 U 개의 단말은 랜덤하게 분포되어 있다. 모든 RU 는 프론트홀을 통해 DU 와 연결되어 있다. RU 는 동일하게 N 개의 안테나를 보유하고 있고 단말들은 단일 안테나를 보유하고 있다.

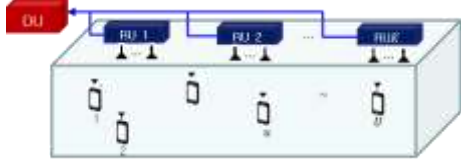


그림 1. 인도어 핫스팟 시나리오.

채널 추정을 위해 단말들은 길이가 L_{seq} 인 SRS 시퀀스, \mathbf{s}_u^{SRS} 를 전력 P_u^{SRS} 를 활용하여 송신하고 RU 들은 채널을 통해 전달된 \mathbf{s}_u^{SRS} 를 자신의 안테나를 통해 수신한다. DU 는 단말들간 서로 SRS 충돌이 발생하지 않도록 자원을 할당했다고 가정하면, RU k 의 n 번째 안테나에서 수신한 단말 u 의 SRS 신호 $\mathbf{y}_{u,k}^{SRS}(n)$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$\mathbf{y}_{u,k}^{SRS}(n) = \sqrt{P_u^{SRS}} [\mathbf{h}_{u,k}(n) \otimes \mathbf{1}_{L_{seq}}]^T \mathbf{s}_u^\pi + \boldsymbol{\eta}_k(n). \quad (1)$$

위 식에서 $\mathbf{h}_{u,k}(n)$ 는 RU k 의 n 번째 안테나와 단말 u 사이의 채널이며, $\boldsymbol{\eta}_k(n)$ 는 전력이 σ^2 인 AWGN 벡터이다. 각 RU 는 $\mathbf{y}_{u,k}^{SRS}(n)$ 를 DU 에게 전달하고 DU 는 각 $\mathbf{y}_{u,k}^{SRS}(n)$ 마다 $\frac{1}{L_{seq}} \{\mathbf{s}_u^{SRS}\}^H$ 를 곱한 후 MMSE 추정 기법을 적용하여 채널을 추정한다. 그러면, 단말 u 와 DU k 의 n 번째 안테나 간 추정 채널, $\hat{\mathbf{h}}_{u,k}(n)$ 그리고 오류채널, $\tilde{\mathbf{h}}_{u,k}(n)$ 과 실제 채널, $\mathbf{h}_{u,k}(n)$ 관계는 아래와 같이 주어진다.

$$\mathbf{h}_{u,k}(n) = \hat{\mathbf{h}}_{u,k}(n) + \tilde{\mathbf{h}}_{u,k}(n). \quad (2)$$

$\tilde{\mathbf{h}}_{u,k}(n)$ 는 평균이 0, 분산이 $\frac{1}{1/|\mathbf{h}_{u,k}(n)|^2 + P_u^{SRS} L_{seq} / \sigma^2}$ 인 복소 정규 분포를 따르는 랜덤 변수이다.

CS 의 경우, DU 는 각 RU 를 독립적으로 제어한다. 이 경우, 각 RU 는 자신과 가장 가까운 $\frac{U}{K}$ 개의 단말을 서비스한다. 전체 U 개의 단말들 중 RU k 로부터 서비스 받는 단말 그룹을 $\Omega_k = \{u | \frac{U}{K}(k-1) + 1 \leq u \leq \frac{U}{K}k\}$ 라 하자. DU k 는 Ω_k 에 속한 단말들의 추정 채널 벡터, $\hat{\mathbf{h}}_{u,k} = [\hat{\mathbf{h}}_{u,k}(1), \dots, \hat{\mathbf{h}}_{u,k}(N)]$ 에 기반하여 프리코딩 벡터 $\mathbf{w}_{u,k}$ 를 산출한 후 프리코딩 된 심볼들을 결합 (combine)하여 송신 신호 $\mathbf{x}_k^{CS} = \sum_{u \in \Omega_k} \mathbf{w}_{u,k} s_{u,k}$ 을 생성한다. \mathbf{x}_k^{CS} 는 RU k 와 Ω_k 에 속한 단말 u 간의 채널, $\mathbf{h}_{u,k}$ 를 통해 단말 u 에게 전달되며 이때 수신신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_{u,k} = \mathbf{h}_{u,k} \mathbf{x}_k^{CS} + \sum_{k' \neq k} \mathbf{h}_{u,k'} \mathbf{x}_{k'}^{CS} + \boldsymbol{\eta}_{u,k}, \quad (3)$$

위 식에서 $\boldsymbol{\eta}_{u,k}$ 는 분산이 σ^2 인 잡음 신호이다.

CF 인 경우 DU 는 K 개의 RU 를 일괄적으로 제어하여 전체 U 개의 단말을 동시에 서비스한다. 이를 위해 DU 는 통합 채널 추정 채널 벡터, $\hat{\mathbf{h}}_u = [\hat{\mathbf{h}}_{u,1}(1), \dots, \hat{\mathbf{h}}_{u,K}(N)]$ 을 생성한다. 이후, 각 u 번째 단말에 대한 통합 프리코딩 벡터 \mathbf{w}_u 를 산출하고 송신 신호 $\mathbf{x}^{CF} = \sum_{u=1}^U \mathbf{w}_u s_u$ 을 생성한다. \mathbf{x}^{CF} 는 프론트홀을 통해 RU들에게 전달되고 RU는 이를 단말들에게 송신한다. 단말 u 가 실제채널 \mathbf{h}_u 를 통해 수신한 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_u = \mathbf{h}_u \mathbf{x}^{CF} + \boldsymbol{\eta}_u. \quad (4)$$

프리코딩은 추정 채널 정보에 기반하여 산출되기 때문에 실제 채널과 추정 채널이 상이할 경우 self-interference 가 발생한다. self-interference 은 Gaussian 분포를 따르지 않기 때문에 실제 크기를 계산 하는것은 매우 어려워 많은 연구에서는 Generalized Mutual Information (GMI) 개념을 사용한다 [5]. 이에 따르면, 실제 채널을 통해 수신한 성분들 중 추정 채널과 오류 채널에 대응하는 신호를 각각 자기신호 성분과 self-interference 성분으로 구분할 수 있다. 그러면, CS 인 경우 Ω_k 에 속한 단말 u 의 SINR 은 다음과 같다.

$$\gamma_{u,k}^{CS} = \frac{\|\hat{\mathbf{h}}_{u,k} \mathbf{w}_{u,k}\|^2}{\mathbb{E}[\|\tilde{\mathbf{h}}_{u,k} \mathbf{w}_{u,k}\|^2] + \sum_{k' \neq k} \|\mathbf{h}_{u,k'}\|^2 + \sigma^2}, \quad (5)$$

위 식에서 분자 항은 추정 채널을 통해 수신한 자기 신호 성분이고 분모 항의 첫 번째 항은 self-interference 이다. $\gamma_{u,k} = \mathbb{E} [\sum_{u' \in \Omega_k \setminus u} \|\mathbf{h}_{u',k} \mathbf{w}_{u',k}\|^2 + \sum_{k' \neq k} \|\mathbf{h}_{u,k'} \mathbf{x}_{k'}^{CS}\|^2]$ 는 Ω_k 내 속한 단말이 이웃 RU 로 부터 수신하는 간섭을 합한 것이다. 한편, CF 의 경우 이웃 RU 에 의한 간섭은 존재하지 않으며, 단말 u 의 SINR 은 아래와 같다.

$$\gamma_u^{CF} = \frac{\|\hat{\mathbf{h}}_u \mathbf{w}_u\|^2}{\mathbb{E}[\|\tilde{\mathbf{h}}_u \mathbf{w}_u\|^2] + \sum_{u' \neq u} \|\mathbf{h}_{u'} \mathbf{w}_{u'}\|^2 + \sigma^2}. \quad (6)$$

본 논문에선 5G 표준이 반영된 시뮬레이터를 구현하여 CS 와 CF 의 성능을 분석하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1 에 제시되어 있다.

표 1 시뮬레이션 파라미터.

SRS sequence length, L_{seq}	24
Carrier frequency	3.65GHz
Subcarrier spacing	30KHz
Number of RBs	275 (100MHz)
(U, K, N)	16, 4, 4
Channel	WINNER2 B3
Transmission power per RU	30dBm/100MHz
Precoding technique	Weighted MMSE
Noise power density	-174dBm/Hz
TDD Configuration	Slot: DDDSU In 'S' slot: D×10, S×2, U×2
Width X Depth X Height	150X50X3

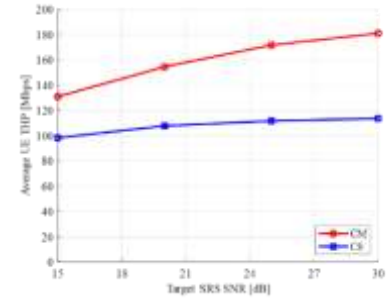


그림 2. Target SRS SNR versus average UE throughput

그림 2는 타겟 SRS SNR 값에 따른 CS 기법과 CF 기법 적용시 단말의 평균 throughput 을 그린 것이다. CF 경우 DU 는 일괄적으로 모든 RU 들을 제어하여 셀간 간섭을 제거 할 수 있기 때문에 그렇지 못한 CS 기법보다 대략 30%~55% 더 높은 성능을 보인다. Target SRS SNR 이 증가할수록 채널 추정 정확도가 증가하여 self-interference 를 감소 시킬 수 있기 때문에 두 기법의 성능이 모두 증가하긴 하나, CS 는 RU 내에서의 간섭만 제거가능하고 셀간 간섭은 처리하지 못하기 때문에 성능 향상폭이 CF 대비 크지 않다.

III. 결론

인도어 핫스팟 환경에선 모든 RU 들이 일괄적으로 동작하는CF기법이 각 RU가 독립적으로 동작하는 CS 기법보다 프리코딩을 통해 간섭을 더욱 잘 처리하기 때문에 더 높은 성능을 보이며, SRS 수신 SNR 이 높을수록 두 기법의 성능 격차가 벌어지는 것을 확인 하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2020 년도 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신 기획평가원의 지원 (2017-0-00316, 차세대 공공 안전 통신 원천기술연구)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] GSA, HUAWEI, "5G-Oriented Indoor Digitalization Solution White Paper", Nov., 2017
- [2] TR 38.801 V14.0.0
- [3] L. M. P. Larsen, et. Al, "A Survey of the Functional Splits Proposed for 5G Mobile Crosshaul Networks," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 21, no. 1, pp. 146-172, 1st 2019
- [4] G. Kalfas et al., "Next Generation Fiber-Wireless Fronthaul for 5G mmWave Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 3, pp. 138-144, March 2019
- [5] T. Yoo and A. Goldsmith, "Capacity and power allocation for fading MIMO channels with channel estimation error," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 5, pp. 2203-2214, May 2006.