

Hybrid Full/Half-duplex IAB 시스템에서 duplex mode 선택에 따른 성능 비교

윤석현, 임병주, 고영채
고려대학교

[daniel419, limbj93, koyc]@korea.ac.kr

Performance Comparison of Duplex Mode Selection in Hybrid Full/Half-duplex IAB System

Seok Hyun Yoon, Byungju Lim, Young-Chai Ko
Korea Univ.

요약

본 논문은 Hybrid full/half-duplex Integrated Access and Backhaul (IAB) 시스템에서 duplex mode 선택에 따른 system throughput 성능을 비교하였다. Full-duplex IAB 시스템은 half-duplex IAB 시스템과 비교했을 때 이론적으로는 2 배의 성능을 얻을 수 있지만 실제로는 추가적으로 발생하는 다양한 유형의 간섭들로 인해 성능이 크게 감소한다. 따라서 이 간섭들에 기반하여 각 IAB node 가 분산적으로 duplex mode 및 아날로그 빔을 선택하는 간단한 알고리즘을 제안한다. 그 후 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘이 모든 IAB node 가 full-duplex 혹은 half-duplex 로 동작할 때 보다 더 높은 성능을 얻을 수 있다는 것을 확인한다.

I. 서론

5G 이동통신에서는 초고속 데이터 전송 속도를 지원하기 위해 가용 주파수 자원이 넓은 밀리미터파 대역을 활용한다. 하지만 밀리미터파는 높은 경로 감쇄 뿐만 아니라 장애물에 취약하기 때문에 많은 소형 셀 기지국들을 설치하여 이를 해결한다. 기존에는 이 소형 셀 기지국들을 코어 네트워크에 유선 백홀로 연결하여 높은 데이터 속도와 신뢰성을 보장하였다. 그러나 많은 소형 셀 기지국들을 유선 백홀로 지원하기에는 높은 비용이 소모되기 때문에 이를 해결하기 위해 백홀 링크를 접속 링크와 같이 무선으로 연결하는 기술이 Integrated Access and Backhaul (IAB)라는 명칭으로 최근 3GPP 표준 Release 16 에 제안되었다 [1].

Release 16 에서 논의되고 있는 IAB 시스템의 백홀 및 액세스 링크 다중화 방식으로 크게 half-duplex IAB 와 full-duplex IAB 가 있다 [1]. Full-duplex IAB 시스템은 백홀 및 접속 링크에 서로 같은 시간 및 주파수 자원을 할당하는 방식으로 서로 다른 시간 및 주파수 자원을 할당하는 half-duplex IAB 시스템과 비교하여 이론적으로 2 배의 system throughput 성능을 얻을 수 있다. 하지만 모든 IAB node 가 full-duplex 로 동작할 경우 자기 간섭 뿐만 아니라 IAB node 간의 간섭, IAB node 및 donor 에서 UE 로의 간섭과 같은 다양한 간섭들로 인해 성능이 크게 감소한다. 따라서 본 논문에서는 이 간섭들에 기반하여 각 IAB node 가 분산적으로 duplex mode 와 아날로그 빔을 선택하는 간단한 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘이 모든 IAB node 가 full-duplex 혹은 half-duplex 로 동작할 때 보다 더 높은 성능을 얻을 수 있다는 것을 확인한다.

II. 본론

본 논문에서는 1 개의 MBS (IAB donor)와 I 개의 SBS (IAB node)로 이루어진 two-tier hybrid full/half-duplex IAB system 을 고려한다. MBS, SBS 각각 N_M, N_S 개의 안테나를 가지고 있으며 SBS 는 MBS 에 무선 백홀로 연결되어 자신에게 접속되어 있는 K 개의 단일 안테나 UE 를 지원한다. 또한 SBS 는 간섭 채널에 따라 full/half duplex mode 를 선택할 수 있으며 이를 index μ 로 표기하여 $\mu = 1$ 일 경우 full-duplex, $\mu = 0$ 일 경우 half-duplex 를 나타낸다. 그리고 SBS 가 half-duplex 로 동작할 경우 time-division multiplexing (TDM) 방식을 사용한다고 가정하여 백홀 링크와 접속 링크를 순차적으로 지원한다.

첫번째 타임 슬롯에서 i 번째 SBS 와 i 번째 SBS 에 있는 k 번째 UE 의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_i^{(S),1} = \mathbf{v}_i^H \mathbf{H}_i^{(0)} \mathbf{F}^{\text{RF}} \mathbf{f}_i^{\text{BB}} x_i^{(M)} + \sum_{j=1, j \neq i}^I \sum_{m \in \mathcal{K}_j} \mu_j \mathbf{H}_i^{(j)} \mathbf{W}_j^{\text{RF}} \mathbf{w}_{j,m}^{\text{BB}} x_{j,m}^{(S)} + \sum_{m \in \mathcal{K}_i} \sigma_{\text{SIC}} \mu_i \mathbf{H}_i^{(i)} \mathbf{W}_i^{\text{RF}} \mathbf{w}_{i,m}^{\text{BB}} x_{i,m}^{(S)} + n_i^{(S)} \quad (1)$$

$$y_i^{(U),1} = \mu_i (\mathbf{g}_{i,k}^{(i)} \mathbf{W}_i^{\text{RF}} \mathbf{w}_{i,k}^{\text{BB}} x_{i,k}^{(S)} + \sum_{j=1}^I \mathbf{g}_{i,k}^{(0)} \mathbf{F}^{\text{RF}} \mathbf{f}_j^{\text{BB}} x_j^{(M)} + \sum_{j=1, j \neq i}^I \sum_{m \in \mathcal{K}_j} \mu_j \mathbf{g}_{i,k}^{(j)} \mathbf{W}_j^{\text{RF}} \mathbf{w}_{j,m}^{\text{BB}} x_{j,m}^{(S)} + n_{i,k}^{(U)}) \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{F}^{\text{RF}}, \mathbf{f}_i^{\text{BB}}$ 는 MBS 의 아날로그, 디지털 빔포밍 행렬, $\mathbf{W}_i^{\text{RF}}, \mathbf{w}_i^{\text{BB}}$ 는 i 번째 SBS 의 아날로그, 디지털 빔포밍 행렬, $\mathbf{H}_i^{(j)}$ 는 j 번째 SBS 에서 i 번째 SBS 로의

채널 ($j=0$ 일 경우 MBS), $\mathbf{g}_{i,k}^{(j)}$ 는 j 번째 SBS 에서 i 번째 SBS 에 있는 k 번째 UE 로의 채널, σ_{SIC} 는 수신단 회로에서의 추가적인 자기 간섭 제어량을 (SIC level) 나타낸다. 또한 \mathbf{v}_i 는 i 번째 SBS 에서의 수신 아날로그 빔포밍 벡터로 $\mathbf{H}_i^{(0)}$ 의 AoA 에 해당하는 array response vector 로 설정하였으며 \mathbf{F}^{RF} , \mathbf{W}_i^{BB} 는 각각 zero-forcing (ZF) 빔포밍 행렬을 사용하여 백홀 링크 간의 간섭과 같은 셀 내의 UE 간의 간섭은 없다고 가정하였다. 이러한 설정 하에 식 (1)과 (2)를 바탕으로 첫번째 타임 슬롯에서 i 번째 SBS 에서의 백홀 SINR 인 $\text{SINR}_i^{\text{BH},1}$ 과 i 번째 SBS 에 있는 k 번째 UE 의 접속 SINR 인 $\text{SINR}_{i,k}^{\text{AC},1}$ 을 계산할 수 있다.

두번째 타임 슬롯에서 i 번째 SBS 와 i 번째 SBS 에 있는 k 번째 UE 의 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_i^{(S),2} = & \mu_i(\mathbf{v}_i^H \mathbf{H}_i^{(0)} \mathbf{F}^{\text{RF}} \mathbf{f}_i^{\text{BB}} x_i^{(M)} \\ & + \sum_{j=1, j \neq i}^I \sum_{m \in \mathcal{K}_j} \mu_j \mathbf{H}_i^{(j)} \mathbf{W}_j^{\text{RF}} \mathbf{w}_{j,m}^{\text{BB}} x_{j,m}^{(S)} \\ & + \sum_{m \in \mathcal{K}_i} \sigma_{\text{SIC}} \mu_i \mathbf{H}_i^{(i)} \mathbf{W}_i^{\text{RF}} \mathbf{w}_{i,m}^{\text{BB}} x_{i,m}^{(S)} + n_i^{(S)}) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_i^{(U),2} = & \mathbf{g}_{i,k}^{(i)} \mathbf{W}_i^{\text{RF}} \mathbf{w}_{i,k}^{\text{BB}} x_{i,k}^{(S)} \\ & + \sum_{j=1}^I \mu_j \mathbf{g}_{i,k}^{(j)} \mathbf{F}^{\text{RF}} \mathbf{f}_j^{\text{BB}} x_j^{(M)} \\ & + \sum_{j=1, j \neq i}^I \sum_{m \in \mathcal{K}_j} \mathbf{g}_{i,k}^{(j)} \mathbf{W}_j^{\text{RF}} \mathbf{w}_{j,m}^{\text{BB}} x_{j,m}^{(S)} + n_{i,k}^{(U)} \quad (4) \end{aligned}$$

식 (3)과 (4)를 바탕으로 두번째 타임 슬롯에서 i 번째 SBS 에서의 백홀 SINR 인 $\text{SINR}_i^{\text{BH},2}$ 과 i 번째 SBS 에 있는 k 번째 UE 의 접속 SINR 인 $\text{SINR}_{i,k}^{\text{AC},2}$ 을 계산할 수 있다.

앞선 식들을 바탕으로 i 번째 SBS 의 백홀 data rate 와 i 번째 SBS 에 있는 k 번째 UE 의 접속 data rate 는 다음과 같다.

$$R_i^{\text{BH}} = \frac{1}{2} \times (\log_2(1 + \text{SINR}_i^{\text{BH},1}) + \log_2(1 + \text{SINR}_i^{\text{BH},2})) \quad (5)$$

$$R_{i,k}^{\text{AC}} = \frac{1}{2} \times (\log_2(1 + \text{SINR}_{i,k}^{\text{AC},1}) + \log_2(1 + \text{SINR}_{i,k}^{\text{AC},2})) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 바탕으로 system throughput 을 최대화하는 duplex mode 및 아날로그 빔 선택 최적화 문제를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\max_{\mu_i, \mathbf{f}_i^{\text{RF}}, \mathbf{w}_{i,k}^{\text{RF}}} \sum_{i=1}^I \min\{R_i^{\text{BH}}, R_{i,k}^{\text{AC}}\} \quad (7)$$

$$\text{subject to } \lambda_i \in \{0,1\} \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_i^{\text{RF}} \in \mathcal{F}, \mathbf{w}_{i,k}^{\text{RF}} \in \mathcal{W} \quad (9)$$

여기서 (9)는 아날로그 빔포밍 벡터가 미리 설정해둔 코드북에서 선택되어야 하는 조건이다.

위의 문제는 integer programming 으로 최적의 해를 얻으려면 exhaustive search 가 필요하므로 복잡도가 높으며 MBS 에서 모든 채널 정보를 알아야 하기 때문에 CSI 정보 교환을 위한 오버헤드가 크다. 따라서 이를 해결하기 위해 분산적으로 각 SBS 에서 자기 간섭 및 MBS 에서 UE 로의 간섭만을 고려하여 아날로그 빔과 duplex mode 를 선택한다. 구체적으로 각 SBS 는 full-duplex/half-duplex 상황에서 모든 아날로그 빔포밍 벡터 조합에 대한 search 를 통해 최대의 system throughput 을 (이때 다른 SBS 로부터의 간섭은 계산하지 않음) 제공하는 아날로그 빔과 duplex mode 를 선택한다.

III. 시뮬레이션 결과

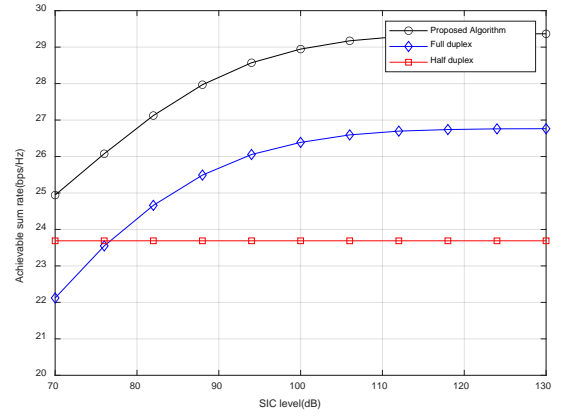


그림 1. SIC level 에 따른 duplex mode 선택 성능 비교

시뮬레이션을 위해 200m 반경을 가지는 MBS 내에 8 개의 SBS 를 랜덤하게 배치하였고 각 SBS 내에는 3 개의 UE 를 랜덤하게 배치하였다. 또한 MBS, SBS 는 64, 16 개의 안테나를 가지고 MBS 와 SBS 의 송신 파워는 46dBm, 30dBm 으로 설정하였다. 채널 모델은 saleh-valenzuela 모델을 사용하고 경로 감쇠 모델 및 링크의 LoS 확률 모델은 UMi 모델 및 3GPP 표준 규격을 따른다고 가정하였다.

시뮬레이션 결과 SIC level 이 낮아 잔류 자기 간섭이 시스템에 크게 영향을 미칠 경우 full-duplex IAB 시스템이 성능이 제일 좋지 않으며 제한한 알고리즘과 half-duplex IAB 시스템의 성능 차가 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 반면 SIC level 이 커져 자기 간섭 외의 다양한 종류의 간섭이 시스템에 크게 영향을 미칠 경우 이 간섭들을 고려하여 duplex mode selection 을 할 때 full-duplex IAB 및 half-duplex-IAB 시스템보다 성능이 좋다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 Hybrid full/half-duplex Integrated Access and Backhaul (IAB) 시스템에서 시스템의 성능을 제한하는 다양한 간섭들을 고려하여 각 IAB node 가 분산적으로 duplex mode 및 아날로그 빔을 선택하는 간단한 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과 제안한 방식을 적용시킬 경우 IAB node 가 모두 full-duplex 및 half-duplex 로 동작하는 시스템과 비교했을 때 system throughput 이 더 좋다는 것을 확인할 수 있었다. 추후 연구에서는 각 SBS 에서 다른 UE 및 IAB node 에 주는 leakage 까지 고려하여 분산적으로 duplex mode 및 아날로그 빔을 선택하는 알고리즘을 개발하여 본 논문에서 제시한 알고리즘의 성능을 개선할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2020R1A4A1019628)

참고 문헌

- [1] NR-Study on Integrated Access and Backhaul, document TR 38.874, 3GPP, 2017