

통합 액세스 백홀 기반 비지상 네트워크에서 백홀 압축률 및 데이터 자원 할당 최적화

이준석, 유희정

고려대학교, 전자·정보공학과

{wnstjr752000, heejungyu}@korea.ac.kr

Backhaul Compression Rate and Data Resource Allocation Optimization in Integrated Access and Backhaul-based NTN

Junseok Lee, Heejung Yu

Department of Electronics and Information Engineering, Korea University

요약

본 논문은 점점 고도화되는 주파수 대역으로 인한 고밀도 기지국 설치 제약의 해결 방안으로, 통합 액세스 백홀을 비지상 네트워크에 접목한 시스템 아키텍처를 제안하였다. 또한, 상향 링크 상황에서 유저의 패킷이 백홀 링크를 통과할 때, 압축 과정의 필요성을 설명하였다. 이를 바탕으로 백홀의 채널 용량 제약하에서 사용자의 전송 용량을 최대화하는 문제를 정의하고, 백홀 압축률과 데이터 자원 할당의 수렴해를 찾는 교차 최적화 알고리즘을 제안하였다.

I. 서론

밀리미터파(Millimeter Wave; mmWave)와 같은 고주파수 대역이 통신 서비스에 상용화되기 시작하고 있다. 고주파수 대역은 넓은 대역폭 확보가 쉽지만, 높은 경로 손실과 회절이 잘 일어나지 않는다. 따라서, 안정적인 통신 환경을 제공하기 위해선 고밀도의 기지국이 필요하지만, 백홀 링크 확보를 위한 광 케이블의 추가 매설은 비용적, 공간적 측면에서 제약이 존재한다[1]. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 백홀 링크를 무선으로 대체하여 기지국이 무선 액세스 링크와 백홀 링크를 제공할 수 있는 통합 액세스 백홀(Integrated Access and Backhaul; IAB) 또는 기지국을 상공에 두는 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network; NTN)를 활용한 네트워크 구조가 거론되고 있다[2]. 본 논문에서는 IAB를 NTN 네트워크에 접목하여 regenerative payload 기반 저궤도 위성(Low Earth Orbit; LEO)을 활용한 IAB-NTN 시스템 아키텍처를 제안한다. 또한, 업링크 상황에서 백홀 링크의 역할을 하는 위성 간 링크(Intel Satellite Link; ISL)의 전송 용량 제약하에 백홀 압축률과 데이터 전력 및 대역폭 자원 할당량을 조절하여 user equipment(UE)의 전송 용량을 최대화하는 최적화 문제를 구성하고, 수렴해를 교차 최적화를 활용하여 제시한다.

II. 시스템 모델 및 최적화 문제 구성

본 논문에서 제안하는 시스템 모델은 그림 1과 같다. 제안한 시스템 모델에는 IAB와 구조적으로 유사함을 갖는 개방형 기지국(Open Radio Access Network; ORAN) 개념이 함께 적용되어 기능 분리(Functional Split) 경계를 통해 각 LEO 위성이 갖는 기능 블록에 차이가 존재한다[3]. IAB donor인 지상 gateway는 Central Unit(CU)의 역할을, IAB node인 LEO는 gateway와 직접 링크의 유무에 따라 Distributed Unit(DU)과 Radio Unit(RU) 기능을 함께 수행하거나 RU의 기능만 수행한다. 먼저, UE는 자신과 연결된 LEO로 액세스 링크 역할을 하는 서비스 링크를 통해 업링크 패킷을 전송하고, LEO는 수신한 패킷을 아래와 같이 데이터와 파일럿 sub-carrier로 구분한다.

$$y_p(n) = \sqrt{P_{T,p} G_h} h p(n) + n_p(n) \quad (1)$$

$$= \sqrt{P_p} h p(n) + n_p(n), n = 1, \dots, N_p$$

$$y_d(n) = \sqrt{P_{T,d} G_h} h d(n) + n_d(n) \quad (2)$$

$$= \sqrt{P_d} h d(n) + n_d(n), n = N_p + 1, \dots, N_p + N_d$$

이때, $p(n)$ 과 $d(n)$ 은 송신 전력이 $P_{T,p}$ 와 $P_{T,d}$ 인 n 번째 파일럿과 데이터 sub-carrier를 의미한다. P_p 와 P_d 는 LEO에 수신된 파일럿, 데이터 전력으로 송신 전력에 경로 손실을 포함한 채널 이득인 G_h 가 곱해진 값이다. $h(\sim \mathcal{CN}(0,1))$ 는 액세스 링크의 채널 계수, $n_p(n)(\sim \mathcal{CN}(0,1))$ 와 $n_d(n)(\sim \mathcal{CN}(0,1))$ 는 전송 과정에서 더해지는 잡음을 나타낸다. N_p 와 N_d 는 파일럿과 데이터의 sub-carrier 개수를 나타내는데, UE는 단일 안테나를 가진다고 가정하여 채널 추정을 위해 필요한 단일 파일럿 sub-carrier인 $N_p = 1$ 로 설정하였다. 본 시스템 모델은 IAB 개념에 따라 할당된 전체 대역폭을 액세스와 백홀 링크에 나누어 사용한다. 이때, 전체 대역폭은 동일한 대역폭을 가진 총 N_t 개의 sub-carrier로 나누어져 있으며, 각 sub-carrier의 대역폭은 1로 정규화되었다고 가정하였다 즉, 액세스 링크에는 $N_d + 1$ 의 대역폭이, 백홀 링크에는 $N_x (= N_t - N_d - 1)$ 의 대역폭이 할당된다.

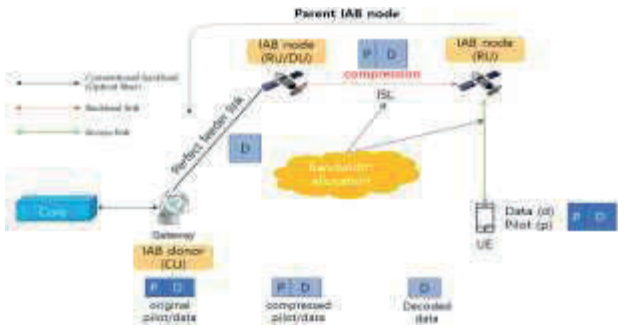


그림 1. 고려하는 IAB-NTN 시스템 모델

그림 1에서, UE로부터 패킷을 전달받은 LEO는 DU의 기능이 없어 이를 디코딩하지 못하고, ISL을 통해 parent IAB node로 전달해야 한다. 이때, 액세스 링크에 많은 대역폭이 사용되면, 자동적으로 ISL에 할당된 대역폭은 줄어들면서 원 신호를 전달하기에 용량이 부족할 수 있다. 이러한 경우, 신호의 압축 과정을 거친 후 데이터의 전달이 이뤄질 수 있다[3].

앞서 언급한 내용으로부터, UE의 상향 링크 전송 용량과 백홀의 채널 용량 사이엔 trade-off가 존재함을 알 수 있다. 액세스 링크에 많은 대역폭을 할당하면 높은 속도의 전송률을 달성할 수 있지만, 백홀의 대역폭이 줄어들면서 신호 전달을 위해선 높은 압축 과정이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 백홀의 채널 용량 제약하에서, 최적의 파일럿과 데이터 압축률 및 데이터 전력과 sub-carrier 수(대역폭) 할당을 통해 UE의 전송 용량을 최대화하는 최적화 문제를 아래와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \max_{N_d, P_d, P_p, \sigma_d^2, \sigma_p^2} \quad & \hat{R}_u(N_d, P_d, P_p, \sigma_d^2, \sigma_p^2) \\ \text{s.t.} \quad & \hat{R}_d(N_d, P_d, \sigma_d^2) + \hat{R}_p(P_p, \sigma_p^2) \leq (N_t - N_d - 1) \log_2 \left(\frac{P_x}{\text{noise}_{ISL}} \right) \\ & N_d P_d + P_p \leq P_{Ta}, (N_t - N_d - 1) P_x \leq P_{Tx} \\ & \sigma_d^2 \geq 0, \sigma_p^2 \geq 0, P_p \geq 0, P_d \geq 0, N_d \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

제한한 최적화 문제는 다변수가 서로 복잡하게 얽혀있어 동시에 최적화를 진행하기엔 어려움이 존재한다. 이를 해결하기 위해, 제한한 최적화 문제를 나머지 변수들은 고정된 채 하나의 변수만을 최적화하는 3개의 부 최적화 문제로 나누어 접근하였다. 또한, 각 부 최적화 문제의 해를 통해 수렴해를 찾는 교차 최적화를 알고리즘 1과 같이 제안하였다. 식(3)과 알고리즘 1에 사용된 수식의 구체적인 전개 과정은 [4]에서 확인할 수 있다.

알고리즘 1: 압축률 및 대역폭, 전력 교차 최적화

초기화: $\epsilon \ll 1, N_d \leq N_t/2$

$|\hat{R}_u[n] - \hat{R}_u[n-1]| > \epsilon$ 을 만족할 때까지 반복

if $n \geq 2, \hat{R}_u[n-1] \leftarrow \hat{R}_u[n]$

for $i=1$ to M 스텝 1, 2 반복

스텝 1: 고정된 대역폭과 전력에서 압축률 최적화

$$\sigma_d^{2*} = P_d(N_d) \frac{1}{N_d+1} \left(\frac{N_t - N_d - 1}{P_{Tx}} \right)^{\frac{N_t - N_d - 1}{N_d+1}}$$

$$\sigma_p^{2*} = P_p \left(\frac{1}{N_d} \right)^{\frac{N_d}{N_d+1}} \left(\frac{N_t - N_d - 1}{P_{Tx}} \right)^{\frac{N_t - N_d - 1}{N_d+1}}$$

스텝 2: 고정된 압축률과 대역폭에서 전력 최적화

$$\frac{\partial \hat{R}_u}{\partial P_d} = 0 \text{을 만족하는 } P_{d1}, P_{d2} \text{ 계산}$$

$$\text{if } \hat{R}_d(P_{d1}) + \hat{R}_p(P_{d1}) < (N_t - N_d - 1) \log_2 \left(\frac{P_{Tx}}{N_t - N_d - 1} \right)$$

$$P_d^* = P_{d1}$$

$$\text{elseif } \hat{R}_d(P_{d2}) + \hat{R}_p(P_{d2}) < (N_t - N_d - 1) \log_2 \left(\frac{P_{Tx}}{N_t - N_d - 1} \right)$$

$$P_d^* = P_{d2}$$

else

$$P_d^* = [P_d | \hat{R}_d(P_d) + \hat{R}_p(P_d) = (N_t - N_d - 1) \log_2 \left(\frac{P_{Tx}}{N_t - N_d - 1} \right)]$$

end

$$\hat{R}_u[n] \text{ 계산 및 } N_d \leftarrow N_d + \text{step size}$$

III. 모의실험 결과

본 장에서는 모의실험을 통해 제안한 알고리즘 1의 수렴해와 분석을 제시한다. 그림 2는 교차 최적화를 통한 UE의 달성 용량을 나타낸 결과이

다. 실험 파라미터는 $N_p = 1, N_t = 301, P_{Ta} = 151 \times 10^3, P_{Tx} = 151 \times 10^3$ 이며, 각 변수의 초기값은 $N_d = 100, \sigma_d^2 = \sigma_p^2 = 10^{-2}, P_d = \frac{P_{Ta}}{N_d + 1} = 1495$ 로 설정하였다. 우선, iteration이 진행될수록 UE의 용량이 단조롭게 증가하다가 특정 지점에 수렴하는 것을 확인할 수 있는데, 알고리즘 1의 수렴 지점과 4개의 최적화 변수 범위를 작게 양자화하여 모두 조합해 최대 UE 용량을 달성하는 지점을 나타낸 그리드 서치(Grid Search) 결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 단일 파일럿 sub-carrier로 인해 데이터 대비 낮은 압축률과 높은 전력을 갖는 것을 볼 수 있다. 마지막으로, 거의 절반의 대역폭이 각 링크에 할당되었는데, 이는 액세스 링크의 전체 파워(P_{Ta})와 백홀 링크의 전체 파워(P_{Tx})가 동일하기 때문으로 해석할 수 있다.

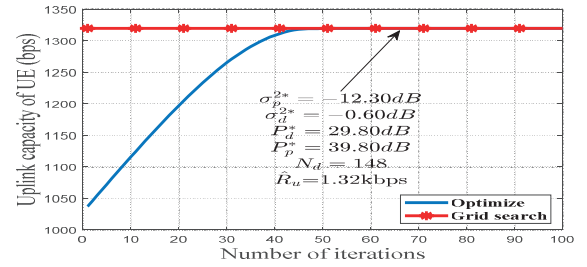


그림 2. 교차 최적화 모의실험 결과

IV. 결론

본 논문에서는 점점 고도화되는 주파수 대역으로 인한, 고밀도 기지국 설치 제약을 해결하는 방안으로 IAB를 NTN 네트워크에 접목한 시스템 아키텍처를 제안하였다. 또한, 제안한 시스템 모델에서 UE의 상향 링크 전송 용량과 백홀의 채널 용량 사이의 trade-off 관계를 제시하였다. 이어서, 파일럿과 데이터의 압축률 및 데이터 자원 할당을 최적화하여 UE의 전송 용량을 최대화하는 최적화 문제를 정의하고, 수렴해를 구하는 교차 최적화 알고리즘을 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2025-00514779) and the Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (2022-0-00704, Development of 3D-NET Core Technology for High-Mobility Vehicular Service).

참고 문헌

- [1] Madapatha, Charitha, et al. "On integrated access and backhaul networks: Current status and potentials." IEEE Open Journal of the Communications Society 1 (2020): 1374-1389.
- [2] Alavicheh, Reza Ghasemi, S. Mohammad Razavizadeh, and Halim Yanikomeroglu. "Integrated Access and Backhaul (IAB) in Low Altitude Platforms." IEEE Open Journal of the Communications Society (2024).
- [3] 이준석, 조충호, and 유희정. "개방형 비지상 네트워크 (Open NTN) 아키텍처 및 연구 방향." 한국통신학회지 (정보와통신) 41.3 (2024): 61-67.
- [4] Lee, Junseok, et al. "O-RAN Based NTN Architecture: Open NTN Concept and Optimization of Power Allocation and Fronthaul Compression." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (2025).