

Joint Minimum-Span Frequency and Power Allocation Technique for IAB Networks

Yong-Jin Song, Ki-Hun Lee, Bang Chul Jung
 Chungnam National University

요약

차세대 통신시스템의 주파수 부족 문제 극복을 위해 최소 대역 주파수 할당(minimum-span frequency allocation: MS-FAP) 문제를 제고한다. 특히, 통합 액세스 및 백홀(integrated access and backhaul network: IAB) 시스템에서 에너지 효율을 추가로 고려한 최소 주파수 할당 기법을 제안한다. 제안한 기술은 주파수 할당과 전력 할당의 반복형 알고리즘으로 구성되며, 에너지 효율을 대폭 향상할 수 있는 결과를 도출했다.

I. 서론

차세대 이동통신 시스템에서는 주파수 부족 문제의 해결을 위해 밀리미터파 또는 테라헤르츠파와 같은 극고주파를 활용하는 기술이 연구되고 다수의 소형 기지국을 고밀도로 배치하는 네트워크 밀집화(densification)가 도입되었다. 하지만, 모든 기지국을 유선으로 연결하는 것은 높은 설비 및 운영비용이 야기되며, 이에 따라 백홀망을 액세스망처럼 무선으로 대체하는 통합 액세스 및 백홀(integrated access and backhaul: IAB) 개념이 3GPP Release 16에서 제안되었다 [1, 2]. 최근 [2]에서는 이 같은 IAB 네트워크에서 주파수 사용 효율 향상을 위해, 네트워크 내 링크의 최소 요구 성능은 보장하면서 필요한 총 대역폭을 최소화하는 최소 대역 주파수 할당 문제(minimum-span frequency allocation problem: MS-FAP)를 제고했다. 하지만, 제안된 기술은 각 링크의 송신 전력에 최대 출력만을 고려하며, 이에 따라 링크의 요구 성능을 훨씬 초과하여 달성하는 경우가 빈번하게 도출된다. 본 논문에서는 IAB 네트워크의 최소 대역 주파수 할당과 동시에 에너지 효율 향상을 위해 전력 할당 알고리즘을 추가로 제안하고 그 성능을 검증한다.

II. 최소 대역 주파수 및 전력 할당 기술

본 논문에서는 문헌 [2]과 동일한 네트워크 토폴로지를 고려한다. 요컨대, 임의의 한정된 영역 내에 스몰셀 기지국(small-cell base station: SBS)이 평균 λ_s 를 갖는 포아송 점 과정(Poisson point process: PPP)에 따라 무작위로 분포하며, 매크로셀 기지국(macro-cell base station: MBS)은 비용 효율성과 백홀 링크의 최소 수신 신호 세기를 보장하기 위해 [2]에서 제안된 방법에 따라 배치한다. 방해물은 germ-grain 모델에 기반하여 선분의 집합으로 모형화한다. 따라서, 두 노드 사이 선분과 방해물 간 교차점이 하나도 없는 경우 해당 링크는 가시선(line-of-sight: LoS) 전파, 그렇지 않은 경우 비가시선(non-LoS) 전파 링크로 고려한다.

알고리즘의 입력 파라미터는 τ 번째 반복에서 네트워크 내 모든 링크 $j, i \in \{1, 2, \dots, L\}$ 간 평균 수신 신호 세기이며, 다음과 같이 정의된다 [3]:

$$r_{j,i}(\tau) = P_i^{\text{Tx}}(\tau) G_{j,i}^{\text{Tx}} G_{j,i}^{\text{Rx}} L_{(lm)} L_{j,i}(\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|), \quad \forall j, i \in \{1, 2, \dots, L\},$$

여기서 $P_i^{\text{Tx}}(\tau)$ 는 알고리즘의 τ 번째 반복에서 링크 i 의 송신 전력, $G_{j,i}^{\text{Tx}}$ 와 $G_{j,i}^{\text{Rx}}$ 는 링크 i 의 송신 노드와 링크 j 의 수신 노드 사이 상대적인 빔 각에 따라 정의되는 송신 안테나 및 수신 안테나 이득을 각각 나타낸다. 또한, $L_{(lm)} = c(4\pi f_c)^{-1}$ 는 빛의 속도 c [m/s]와 반송파 주파수 f_c [Hz]에 따른 단위 거리(1m) 당 전파 손실, $L_{j,i}(\|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|)$ 는 [2, (2)]와 같이 정의되는 링크 i 의 송신 노드와 링크 j 의 수신 노드 사이 경로 손실을 나타낸다. 한편, 문헌 [2]에서 제안된 기술은 각 통신 노드에 대해 최대 송신 전력만 고려한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 [2, Algorithm I]과 전력 할당을 반복(iterative)하여 수행한다. 우선, 링크의 최대 송신 전력을 고려하여 유도된 평균 수신 신호 세기 행렬을 통해 주파수를 할당한다 [2, Algorithm II]. 이후, 다음과 같이 링크의 송신 전력을 갱신하며, 직관적으로 현재 주파수 할당 결과에 따른 간섭으로부터 임계 신호 대 간섭 및 잡음비(SINR)를 만족하도록 할당한다:

$$P_j^{\text{Tx}}(\tau+1) = \frac{\gamma_{\text{th}}}{\gamma_j(\tau)/P_j^{\text{Tx}}(\tau)}, \quad (1)$$

여기서 γ_{th} 는 링크의 성능 요구 조건에 따라 대응되는 SINR 임계값을 의미하며, $\gamma_j(\tau)$ 는 τ 번째 반복에서 주파수 할당 [3, Algorithm I] 결과에 따

른 링크 j 의 SINR을 나타낸다:

$$\gamma_j(\tau) = \frac{r_{j,j}(\tau)}{\sum_{i \in \{1, 2, \dots, L\}} r_{j,i}(\tau) I(|f_j(\tau) - f_i(\tau)|) + N_0 W_j},$$

여기서 $I(|f_j(\tau) - f_i(\tau)|)$ 는 [2, (4)]와 같으며, $f_j(\tau)$ 는 τ 번째 반복에서 [2, Algorithm I]을 진행한 후, j 번째 링크에 할당된 주파수를 의미한다. 또한, N_0 와 W_j 는 각각 잡음의 전력 스펙트럼 밀도와 채널 대역폭을 나타낸다.

최종적으로, 제안하는 알고리즘은 [2, Algorithm I]과 (1)을 반복적으로 수행하며, 송신 전력 갱신 후 주파수 할당을 수행했을 때, 총 요구 대역폭이 이전 반복 대비 증가하거나, 주파수와 전력 할당 결과가 이전 반복과 동일하면 알고리즘을 종료한다.

III. 모의실험 결과 및 결론

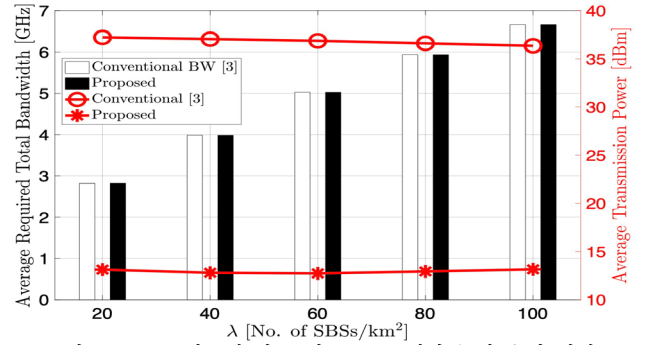


그림 1. SBS 밀도에 따른 평균 요구 대역폭 및 송신 전력

그림 1은 SBS의 밀도에 따른 평균 총 요구 대역폭과 링크의 송신 전력을 나타낸다. 모의실험 파라미터는 [2, Table III]과 동일하게 정의했다. 우선, 각 링크의 송신 전력이 낮아지면서, 링크 간 간섭 완화로 요구 대역폭 관점에서 성능 향상을 기대했으나, 송신 전력 감소와 함께 자기 링크(desired link)의 수신 감도도 줄어들면서 요구 대역폭 관점에서는 [2]와 동일한 성능 결과를 관찰했다. 하지만, 링크의 평균 송신 전력의 경우 대폭 줄일 수 있는 결과를 도출했다. 구체적으로, 평균 0.38%의 송신 전력만으로도 각 링크의 최소 요구 성능을 보장할 수 있는 결과를 도출했으며, 이는 에너지 효율 향상을 의미한다. 향후, 전력 할당 최적화까지 고려한 최소 대역 주파수 할당 문제를 공식화(formulation)하고 본 논문에서 제안한 알고리즘을 고도화할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No.NRF-2022R111A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] K. -H. Lee, H. -W. Lee, H. Lee, and B. C. Jung, "PRADA: Practical access point deployment algorithm for cell-free industrial IoT networks," in *Proc. IEEE CCNC 2023*, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2023, pp. 313-316.
- [2] K. -H. Lee, H. W. Lee, H. Lee, S. H. Chae, Y. Kim, and B. C. Jung, "minFAST: Minimum span frequency assignment technique for integrated access and backhaul networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 6, pp. 8222-8227, Jun. 2023.