

LEO 위성 시스템을 위한 자원 할당 알고리즘의 연구 동향에 대한 조사

김가현, 이동현, 원동욱, 허동현, 홍성훈, 임유진*, 조성래
중앙대학교, 숙명여자대학교*

{ghkim, dhlee, dwwon, dhur, shong}@uclab.re.kr, yujin91@sookmyung.ac.kr*,
srcho@cau.ac.kr

A Survey on Research Trends in Resource Allocation Algorithms for Leo Satellite System

Kim Gahyun, Lee Donghyun, Won Dongwook, Hur Donghyeon, Hong Seonghun, Lim
Yujin*, Cho Sungrae
Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang Univ, Sookmyung
Univ.*

요 약

저궤도 위성(Low Earth Orbit) 통신 시스템의 발전으로 인한 자원 경쟁의 심화로 자원 할당 문제가 대두된다. 본 논문에서는 위성 통신 시스템의 처리량과 자원 활용도를 향상시켜 더 좋은 효율성을 보이기 위한 자원 할당 알고리즘을 조사하여 제시한다. 또한, 각 연구에 대한 세부 알고리즘 및 결과 분석을 제시하여 제안한 알고리즘들이 우수하다는 것을 보여준다.

I. 서론

저궤도 위성(Low Earth Orbit)은 500km~1500km 범위의 고도 궤도를 가지는 위성으로, 저궤도 위성을 사용한 통신은 최근 몇 년 동안 향상된 데이터 속도로 전세계적인 무선 액세스를 제공할 수 있는 잠재력을 가졌다고 평가받고 있다. 다른 궤도의 위성의 비해 전송 지연 신호 지연이 낮아 실시간 통신과 더 높은 처리량을 가능하게 한다. [1]

그러나 저궤도 위성 통신 시스템의 급속한 발전으로 인해 스펙트럼 자원 경쟁이 심화되어, 통신을 위한 자원이 부족하게 되었다. 따라서 위성 통신 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 자원 할당 알고리즘이 저궤도 위성 통신 네트워크에서 중요한 관심사로 떠오르게 되었다. [2]

본 논문에서는 저궤도 위성 시스템을 위한 자원 할당 알고리즘의 다양한 연구에 대해 조사하고, 향후 연구 방향을 제시하며 마무리한다.

II. 본론

[3]의 저자들은 동적 경매 및 LSH 기반 예측을 통한 자원 할당 알고리즘을 제시한다. 지상국이 자신이 선호하는 자원에 대해 동적으로 입찰하는 분산 경매를 기반으로 한 할당 메커니즘을 활용하여, 위성국 링크 간의 다양성을 동적으로 활용해 전체 채널 용량을 개선하여 전송 전력을 줄인다.

경매 과정은 주기적으로 발생하며, 주기 길이는 채널 페이딩의 특성과 오버헤드 요구 사항에 따라 결정된다.

주요 과정으로는 각 기지국이 서브 채널의 용량을 예측하고, 예측된 용량을 기준으로 채널을 정렬한다. 각 기지국은 가장 높은 용량을 가진 채널을 선택하여 입찰에 참여하게 된다. 이때, 가장 높은 용량을 가지는 채널을 선택하는 식은 다음과 같다

$$S'_n = \underset{j}{\operatorname{argmax}} \left(\sum_{q=1}^j \eta_{n,i_n,q} - \frac{j \sum_{q=2}^S \eta_{n,i_n,q}}{S-1} + \frac{\sum_{q=1}^S \eta_{n,i_n,q} - S \eta_{n,i_n,1}}{S-1} \right) \quad (1)$$

위성은 각 서브 채널을 최고 입찰을 제시한 기지국에 할당하고, 용량 수요가 충족되었는지를 판단한다. 시스템은 다운링크에 대한 최종 할당을 사용하여 데이터 전송을 계속하거나 수행한다.

시뮬레이션 결과, 16 개의 지상국과 600 개의 서브채널을 사용하는 환경에서 제안된 경매 기반 자원 할당 알고리즘은 랜덤 할당에 비해 평균적으로 5.2dB 더 높은 SNR 을 보여주었으며, 용량 표준 편차 측면에서도 공정한 자원 할당을 보장한다. 또한 NP-hard 인 최적 할당에 비해 계산 복잡도를 $O(S)$, $O(S \log^2 S)$ 로 단순화한다. 제안된 알고리즘은 효율적인 자원 할당과 전력 절감을 동시에 달성할 수 있음을 보여준다.

[4]의 저자들은 게임 이론에 기반한 다목적 최적화 자원 할당 알고리즘을 제안한다. 잠재적 게임이론과 시뮬레이션 어닐링 기법을 결합한 Rise Response Simulated Annealing (RR-SA) 알고리즘을 통해 시스템이 로컬 최적 상태에서 벗어나 전역 최적 상태에 가까워질 수 있도록 하였다. RR-SA 알고리즘은 분산 반복 방식을 통해 대역폭과 전력의 공동 할당을 실현하며, 시스템의 처리량과 자원 이용의 공정성을 향상시킨다.

시뮬레이션 결과는 제안된 RR-SA 알고리즘의 효율성을 보여준다. 시스템은 약 700 회 반복 후에 안정적인 내쉬 균형에 도달하며, 사용자 유틸리티 기능은 안정화되고 전체 전력 분포는 일관되게 유지된다. 제안된 알고리즘은 Better Response (BR) 알고리즘과 Q-learning 기반 알고리즘(RL)과 비교한 시뮬레이션에서도 우수한 성능을 보인다. 다양한 사용자 수에서 BR 및 RL 알고리즘보다 사용자 만족도가 높고, 복잡한 지상 환경에 더 잘 적응할 수 있음을 알 수 있다.

[5]의 저자들은 계약이론에 기반한 경량 분산 위성 자원 할당 방법을 제안한다. 리소스를 제공하는 위성을 공급자라고 하고, 공동 작업으로 인해 리소스를 요청하는 위성을 요청자라고 할 때, 공급자가 자원을 할당하도록 장려하기 위해 요청자는 공급자에게 금전을 보상한다. 해당 논문의 모델은 공급자가 제공할 수 있는 CPU 리소스와 요청자가 지불할 수 있는 돈의 조합을 개발한 다음 이를 위성 네트워크에 발표하고 계약으로 설정하는 것을 목표로 하였다.

요청자가 요청한 작업의 긴급성 또는 중요성과 공급자가 제공하는 CPU 자원 $q(\theta)$, 요청자가 지불하는 결제 $t(\theta)$ 를 모두 포함하여 모델의 계약을 정의하고, 요청자의 효용과 공급자의 효용을 정의한다. 이 때, 공급자는 자신의 사용자에게 서비스를 제공해야 하기 때문에 과도하게 자원을 사용하게 되면 이익이 오히려 감소한다는 점을 고려해야 한다. 추가로 협업 작업에는 도메인 간에 통신하기 위한 여러 위성이 필요하므로, 공급자가 CPU 리소스를 적극적으로 기여하도록 동기를 부여하기 위해 공급자의 utility를 최대화하는 것을 목표로 하는 최적화 문제를 설계한다.

계약이론 기반 알고리즘과 비교하기 위해 두 가지 다른 인센티브 알고리즘을 선택하였다. 하나는 정보 비대칭이 없는 최선의 상황을 최적의 솔루션으로 선택하고, 다른 하나는 선형 가격이라는 가장 일반적인 경우이다. 시뮬레이션 결과 CPU 자원 요구량은 개인 정보에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있고, 정보 비대칭이 없는 경우의 $q(\theta), t(\theta)$ 가 정보 비대칭이 있는 경우보다 높으며, 이는 정보 비대칭이 거래 효율성을 어느 정도 감소시키는 것을 의미한다. 해당 논문의 목표는 공급자가 CPU 자원을 적극적으로 기여하도록 동기를 부여하기 위해 공급자의 효용을 최대화하는 것으로, 제안된 계약 알고리즘은 인센티브 호환성을 충족함을 입증하였고, 전통적인 선형 알고리즘보다 더 나은 성능을 보여 우수한 것을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성 통신 시스템에서의 자원 할당 알고리즘에 대한 다양한 연구들을 조사하고 연구 방향을 제시하였다. 동적 경매 및 LSH 기반 예측을 결합한 알고리즘, 게임 이론을 기반으로 한 RR-SA 알고리즘, 그리고 계약 이론에 기반한 경량 분산 위성 자원 할당 방법을 소개하여 각 알고리즘들이 각각 다른 방식으로 자원 할당의 효율성과 공정성을 향상시키는데 기여하며, 시뮬레이션 결과를 통해 이를 검증하였다. 논문의 결과는 위성 통신 시스템에서 자원 할당에 대한 새로운 접근 방식이 필요함을 제시하며, 향후 연구에 대한 기반을 제공한다.

ACKNOWLEDGMENT

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2024-RS-2022-00156353, IITP-2024-RS-2023-00258639)

참 고 문 헌

- [1] S. Zhang, A. Liu and X. Liang, "A Multi-objective Satellite Handover Strategy Based on Entropy in LEO Satellite Communications," 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2020, pp. 723-728
- [2] J. Tang, D. Bian, G. Li, J. Hu and J. Cheng, "Resource Allocation for LEO Beam-Hopping Satellites in a Spectrum Sharing Scenario," in IEEE Access, vol. 9, pp. 56468-56478, 2021
- [3] L. Cheng and B. A. Huberman, "Satellite Resource Allocation via Dynamic Auctions and LSH-based Predictions," 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), Florence, Italy, 2023, pp. 1-5,
- [4] D. Lv, X. Song and L. Lei, "Multi-objective Optimization Satellite Resource Allocation Algorithm Based on Game Theory," 2022 IEEE 22nd International Conference on Communication Technology (ICCT), Nanjing, China, 2022, pp. 384-388,
- [5] Z. Li and C. Jiang, "Distributed Satellite Resource Allocation Mechanism Based on Contract Theory," ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications, Seoul, Korea, Republic of, 2022, pp. 4577-4582,