

유전 알고리즘을 활용한 저궤도 위성 네트워크와 지상 서비스 간 동적 채널 할당

Dynamic channel allocation between low-orbit satellite networks and terrestrial services using genetic algorithm

조 연 기*, 조 한 신**

Yeongi Cho*, Han-Shin Jo**

Abstract

This paper presents a solution to the frequency coexistence problem between low earth orbit (LEO) satellite networks and other services by utilizing genetic algorithms. Non-terrestrial network (NTN) utilizing LEO satellites have mobility and need to address interference issues that may occur when sharing frequencies with terrestrial services according to propagation rules. In this study, we model the interference scenario based on the NTN operation scenario proposed by 3GPP, and derive the optimal channel allocation scheme for NTN to protect terrestrial services while satisfying the minimum quality of service (QoS) through genetic algorithm. The simulation results show that the proposed method outperforms the existing fixed assignment method and graph coloring method, and enables efficient frequency sharing.

요 약

본 논문은 유전 알고리즘을 활용하여 저궤도 위성 네트워크(LEO)와 다른 서비스 간의 주파수 공존 문제에 대한 해결 방안을 제시한다. LEO 위성을 이용하는 비지상 네트워크(NTN)는 동적 특성을 가지고 있으며, 전파 규칙에 따라 타 서비스와 주파수를 공유할 때 발생할 수 있는 간섭 문제를 해결해야 한다. 본 연구에서는 3GPP에서 제안한 NTN 운용 시나리오를 기반으로 간섭 시나리오를 모델링하고, 유전 알고리즘을 통해 NTN이 지상 서비스를 보호하면서도 최소한의 서비스 품질(QoS)을 만족하는 최적의 채널 할당 방안을 도출하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 방법은 기존의 고정 할당 방식이나 그래프 컬러링 방식보다 우수한 성능을 보였으며, 효율적인 주파수 공유가 가능함을 확인하였다.

Key words : Dynamic channel allocation, Frequency sharing, Genetic algorithm, Graph coloring, Non-terrestrial network (NTN)

* Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University

★ Corresponding author

Email : hsjo23@hanyang.ac.kr, Tel : +82-2-2220-2891

※ Acknowledgment

This work was supported by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT) grant funded by the Korea government(DAPA(Defense Acquisition Program Administration)) (21-106-A00-007, Space-Layer Intelligent Communication Network Laboratory, 2022).

Manuscript received Sep. 9, 2024; revised Sep. 24 2024; accepted Sep. 24, 2024.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

최근 위성 통신은 넓은 커버리지 영역, 긴 통신 거리, 빠른 배치 및 지상 네트워크의 적은 간섭과 같은 다양한 측면에서 우수한 성능 덕분에 많은 주목을 받고 있다[1]. 3rd Generation Partnership Project(3GPP)는 5G의 생태계 확장 및 활성화를 위해 위성과 무인 항공기를 사용하는 5G new radio(NR) 기반 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN)를 고려하고 있으며[2], 특히 저궤도(Low-Earth Orbit, LEO) 위성을 이용한 NTN 통신은 정지 궤도(Geostationary Orbit, GSO) 위성 대비 낮은 전송지연 특성을 가진다. 이러한 특성 때문에, SpaceX, OneWeb, Telesat, Amazon 등 다양한 기업에서도 LEO 위성을 이용하여 다수의 저궤도 군집 위성 운용을 통해 글로벌 ICT 서비스를 제공하는 것을 목표로 하고 있다[3].

그러나 새로운 서비스의 등장은 기존 지상 서비스와의 간섭 문제를 야기한다[4]. 국제전기통신연합(International Telecommunication Union, ITU)의 전파 규칙 제 22 조 2항에 따르면, 비정지(Non-GSO, NGSO) 위성은 GSO 위성 서비스를 무조건적으로 보호해야 하며, 타 서비스의 간섭에 의한 보호 요청을 할 수 없다. 이에 따라, NGSO 위성의 원활한 운용을 위해서는 GSO 및 타 지상 서비스와의 주파수 공유 연구가 선행되어야 한다.

저궤도 위성과 관련된 동적 채널 할당 알고리즘은 이미 다양한 방법으로 수행되었다[5]. 그러나 대부분은 저궤도 위성의 성능을 최적화하는데 집중하고 있으며, 타 서비스와의 간섭 문제에 대한 연구는 다루지 않거나 향후 과제로 미뤄놓은 상태이다. 이러한 배경을 바탕으로, 본 논문에서는 3GPP에서 제안한 NTN 운용 시나리오를 기반으로 지상 서비스와의 간섭 상황을 가정, NTN이 타 서비스를 보호하는 동시에 NTN의 서비스 품질(Quality of Service, QoS)을 만족하는 동적 채널 할당 알고리즘을 제안한다.

II. NTN 구현 및 간섭 시나리오

1. NTN 구현

그림 1은 본 논문의 간섭 시나리오를 보여준다. NTN은 N 개의 다중 빔을 형성하며, 각 빔 내에는 사용자 장비(User Equipment, UE)가 랜덤한 위치에 분포된다. 각 빔에는 F 개의 채널 중 하나가 할당되며, 전체 빔에 할당된 채널 조합은 $\mathbf{C} = \{c_1, \dots, c_n, \dots, c_N\}$ 으로 정의

된다. 여기서 n 번째 빔에 분포된 UE의 하향링크 신호 대 잡음 간섭비(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)는 다음과 같다.

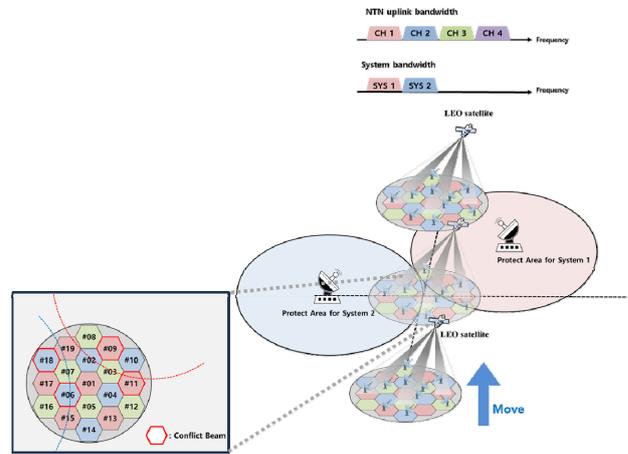


Fig. 1. Non-terrestrial network and interference scenario.
그림 1. 비 지상 네트워크 및 간섭 시나리오

$$\gamma_n(\mathbf{C}) = S_n / \left(\sigma^2 + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N I_{n,m} \right), \quad (1)$$

S_n 은 n 번째 빔에 분포된 UE가 받는 위성의 신호 전력으로, 다음과 같이 계산된다.

$$S_n = P_t \cdot G_{UE,n} \cdot G_{SS,n} \cdot L_p \quad (2)$$

여기서, P_t 는 위성의 송신 전력을, $G_{UE,n}$ 과 $G_{SS,n}$ 은 n 번째 UE와 n 번째 위성 빔 간 송수신 안테나 이득을 의미하며[2], L_p 는 경로손실을 의미한다.

UE의 안테나 방향은 위성을 향하기 때문에 최대 안테나 이득을 가정하며, $G_{SS,n}$ 은 위성 빔과 UE 사이의 off-axis angle θ 를 이용하여 다음과 같다.

$$G_{\max} \quad \text{for } \theta = 0$$

$$G_{\max} + 10 \log_{10} \left(4 \left| \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right| \right) \quad \text{for } 0 < |\theta| \leq 90^\circ, \quad (3)$$

여기서, k 는 파장, a 는 안테나 직경, G_{\max} 는 위성 빔의 최대 안테나 이득을 의미하며, $J_1()$ 은 1차 베셀 함수를 의미한다[2].

L_p 는 위성과 UE 간 경로손실로, 자유공간 경로손실과 대기층에 의한 감쇠[6], 새도잉 마진의 합으로 계산된다.

식 (1)에서, σ^2 은 잡음 전력을, $I_{n,m}$ 은 n 번째 빔에 분포된 UE가 m 번째 위성 빔으로부터 받는 간섭을 의미하며, 다음과 같다.

$$I_{n,m} = P_t \cdot G_{UE,n,m} \cdot G_{SS,n,m} \cdot L_p \cdot \delta_{n,m}, \quad (4)$$

여기서, $G_{UE,n,m}$ 과 $G_{SS,n,m}$ 은 m 번째 위성 빔과 n 번째 빔에 분포된 UE 사이의 송수신 안테나 이득을 의미하며, 두 빔이 같은 채널인 경우 $\delta_{n,m}$ 은 1, 다른 경우 0으로 동일한 채널을 사용하는 경우에만 간섭으로 작용된다.

2. 간섭 시나리오

그림 1과 같이, LEO 위성은 일정 경로를 따라 이동하면서 다양한 지상 시스템(피간섭원)을 마주칠 수 있다. 본 논문에서 피간섭원은 NTN의 채널과 겹치는 서로 다른 대역을 사용하고 있으며, 보호 영역은 100km 반지름을 가진다고 가정한다. NTN은 전파규칙에 따라 피간섭원을 보호해야 할 의무를 지니며, 동시에 NTN의 QoS를 유지해야 한다. 우리는 이를 위해, 유전 알고리즘을 이용하여 피간섭원을 보호하는 동시에 NTN의 QoS를 만족하는 NTN 채널 조합 C 를 찾는다.

III. 유전 알고리즘 기반 NTN 동적 채널 할당 알고리즘

그림 1의 간섭 시나리오에서, 피간섭원을 1차 사용자, NTN 각 빔을 2차 사용자로 가정하는 경우, C 를 찾는 문제는 인지 무선 네트워크(Cognitive Radio Network, CRN)에서의 동적 주파수 할당 문제와 매우 유사하다[7]. 이를 이용하여 우리는 CRN에서 사용되는 대표적인 알고리즘인 유전 알고리즘을 이용하여 두 서비스의 공존 문제를 해결한다.

그림 2와 3은 유전 알고리즘 구조 및 한 세대의 구성을 보여준다. 여기서 각 염색체는 NTN의 채널 조합을 나타내며, N 개의 유전자로 구성된다. n 번째 유전자의 값은 n 번째 빔에 할당된 채널을 의미한다. K 개의 염색체는 하나의 집단을 이루고 있으며 그림 2와 같이 선택, 교차, 변이, 대치를 통해 다음 세대로 진화한다[7].

선택은 집단 내에서 부모 염색체를 선택하는 과정을 의미한다. 모든 염색체는 해당 문제에 대해 염색체가 표현하는 해가 얼마나 적합한지를 나타내는 적합도를 가지고 있으며, 이는 채널 할당 조합 C 에 대해 최소 SINR으로 정의된다. 이 값을 기반으로, 집단에서 룰렛 휠 선택 방법을 따라 2개의 부모 염색체를 선택한다.

교차는 선택된 2개의 부모 염색체의 단일 부분이 서로 교차 상속되어 자손 변수들에게 유전되는 과정으로, 일반적으로 1점 교차, 2점 교차, 균등 교차 등이 존재한다. 본 연구에서는 충돌 기반 교차 방식을 이용한다[7]. 모든 염색체는 적합도 외에 충돌 벡터를 가지며, 피간섭원의

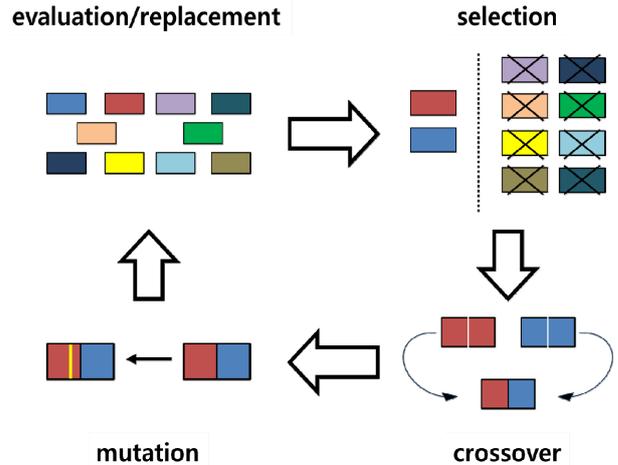


Fig. 2. Genetic algorithm structure.
그림 2. 유전 알고리즘 구조

보호영역 내에 존재하는 NTN 빔이 동일한 채널을 사용하는 경우, 충돌값은 1, 그 외의 경우 0을 가진다. 충돌 기반 교차는 충돌 값이 0인 유전자를 우선적으로 상속받으며, 부모 염색체의 충돌 값이 동일한 경우, 부모 염색체의 서로 다른 유전자를 상속한다. 변이는 교차를 통해 만들어진 새로운 자식 해에게 일정 확률로 돌연변이를 일으켜주는 과정으로, 본 연구에서는 충돌 기반 교차 방식을 선택, 충돌 값이 1인 유전자 중 하나를 랜덤한 값으로 변경한다. 마지막으로 대치를 통해 현재 세대의 염색체들을 새로이 만들어진 자식 세대의 염색체들로 교체하며, 추가로 엘리트주의를 이용하여 이전 세대에서 가장 높은 적합도를 가진 상위 5%의 염색체들을 그대로 보존, 최적 해가 무작위적으로 손실되는 것을 방지한다.

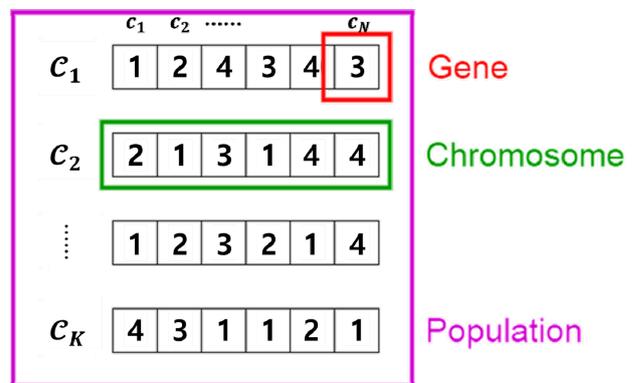


Fig. 3. Population structure of genetic algorithm.
그림 3. 유전 알고리즘의 객체 구조

이러한 과정을 반복하여, 가장 높은 적합도를 가지는 염색체를 최종 NTN 채널 할당 조합으로 선정한다.

Table 1. Simulation parameters[2].

표 1. 시뮬레이션 파라미터[2]

Parameters	Range	Unit
Frequency	20	GHz
LEO orbit	600	km
Antenna diameter	0.5	m
Beam diameter	20	km
Satellite max antenna gain	38.5	dBi
UE max antenna gain	39.7	dBi
UE antenna temperature	150	K
SINR threshold(γ_{th})	6	dB

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 환경은 그림 1과 같이 NTN은 (0, -100)부터 (0, 220)까지 이동하면서 40km 간격으로 새로운 채널을 할당한다. 피간섭원은 2개로, (60, 80), (-100, 0)에 위치해있으며, NTN의 채널 1, 2와 동일한 대역을 사용한다. 표 1은 NTN의 시뮬레이션 파라미터를 보여준다.

그림 4와 5는 간섭 상황에서 NTN의 이동에 따른 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 3은 피간섭원의 보호 조건을 만족하는 NTN 빔 개수를, 그림 4는 각 채널 할당 방법에 따라 모든 빔의 SINR을 계산 후, 그 중 최소 SINR을 보여준다.

시뮬레이션 결과, 주파수 재사용 계수 4를 사용하는 가장 일반적인 고정 할당 방법은 가장 높은 SINR을 보여주지만, 타 서비스와의 간섭 문제를 고려하지 않기 때문에 피간섭원과의 잦은 충돌로 인해, 타 서비스와의 주파수 공유 문제를 해결할 수 없다. 그래프 컬러링 방법은 CRN 문제를 해결하기 위한 전통적인 방법 중 하나로, CRN을 그래프로 변환하고 1차 사용자를 피하는 동시에 인접한 정점끼리 같은 색을 갖지 않도록 모든 정점에 색상을 지정하는 방법이다[7]. 이 방법은 고정 할당 방식보다 높은 주파수 공유 가능성을 보여주지만, NTN의 성능을 과도하게 희생하여 QoS 유지를 위한 최소 SINR인 γ_{th} 를 만족하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 제안한 유전 알고리즘 기반 동적 채널 할당 알고리즘의 경우, 모든 상황에서 피간섭원과의 간섭 문제를 해결하는 동시에 γ_{th} 까지 만족하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 증가하는 LEO 위성 서비스에 따른 타

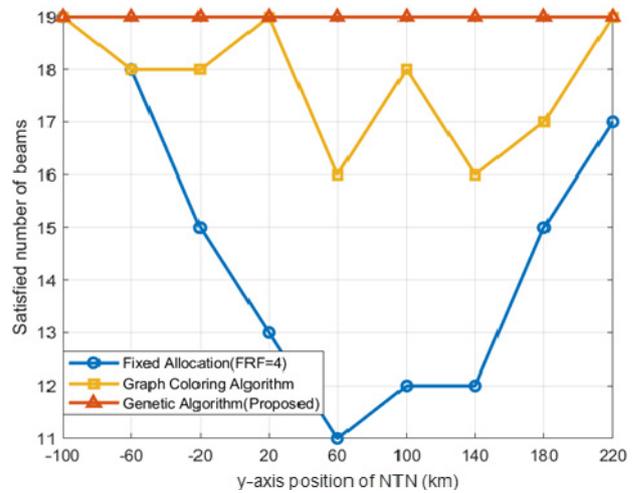


Fig. 4. Simulation results (number of beams satisfying constraints).

그림 4. 시뮬레이션 결과 (제약조건을 만족하는 빔 개수)

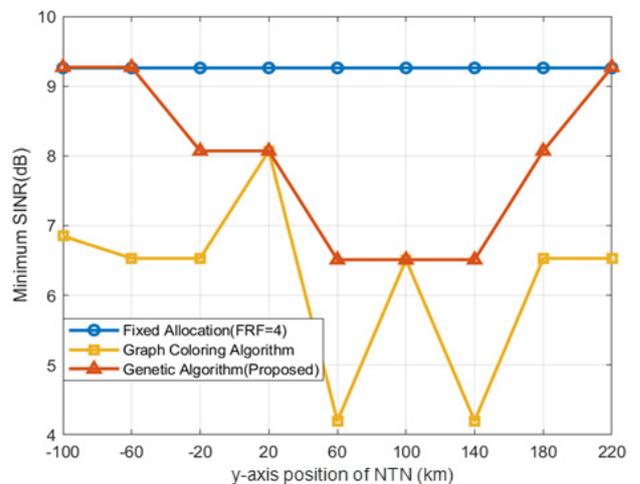


Fig. 5. Simulation results (minimum SINR).

그림 5. 시뮬레이션 결과 (최소 SINR)

서비스와의 공존 문제를 해결하기 위해, 유전 알고리즘 기반 NTN의 동적 채널 할당 알고리즘을 제안하였다. 3GPP의 NTN 운용 시나리오를 기반으로 NTN을 구현하고, 지상 서비스를 피간섭원으로 가정하여 NTN이 이동하면서 발생하는 간섭 시나리오를 모델링하였으며, 유전 알고리즘을 통해, NTN이 피간섭원을 보호하는 동시에 QoS를 만족하는 채널 할당 조합을 찾는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘은 기존 고정 할당 또는 그래프 컬러링 방식 대비 피간섭원과의 주파수 공유 문제를 완벽하게 해결하였으며, 동시에 NTN의 QoS 또한 유지 가능성을 확인하였다. 향후 계획으로는 머신러닝을 활용하여 유전 알고리즘의 처리 속도 및 정확성을 개선할 계획이다.

References

- [1] P. Kim, J.-G. Ryu, and W. Byun, "Research trends in global wireless communication technology based on the LEO satellite communication network," *ETRI Electronics and Telecommunications Trends*, vol.35, pp.83-91, 2020.
DOI: 10.22648/ETRI.2020.J.350507
- [2] Technical Specification Group Radio Access Network; Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN), document TR 38.821 v.16.1.0, 3GPP, May, 2021.
- [3] H. Al-Hraishawi, H. Chougrani, S. Kisseleff, E. Lagunas, and S. Chatzinotas, "A survey on non-geostationary satellite systems: The communication perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.25, no.1, pp.101-132, 2022.
DOI: 10.1109/COMST.2022.3197695
- [4] Use of the frequency bands 17.7-18.6 GHz, 18.8-19.3 GHz and 19.7-20.2 GHz (space-to-earth) and 27.5-29.1 GHz and 29.5-30 GHz (Earth-to-space) by earth stations in motion communicating with non-geostationary space stations in the fixed-satellite service, WRC-19. Resolution, 173, 2019.
- [5] F. Zheng, Z. Pi, Z. Zhou, & K. Wang, "LEO satellite channel allocation scheme based on reinforcement learning," *Mobile Information Systems*, 2020. DOI: 10.1155/2020/8868888
- [6] ITU-R Recommendations, "P.619 : Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth," 2021.
- [6] W. Wang, X. Liu, "List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks," *VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference*, vol.1, pp.690-694, 2005.
DOI: 10.1109/VETEFCF.2005.1558001
- [7] J. Elhachmi, J. Z. Guennoun, "Cognitive radio spectrum allocation using genetic algorithm," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016.
DOI: 10.1186/s13638-016-0620-6

BIOGRAPHY

Yeongi Cho (Member)



2018 : BS degree in Electronic Control Engineering, Hanbat National University.

2020 : MS degree in Electronic Engineering, Hanbat National University.

2020~2024 : PhD. degree in Electronic Engineering, Hanbat National University.

2024~present : Post-Doc. in Hanyang University.

Han-Shin Jo (Member)



2001 : BS degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2004 : MS degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2009 : PhD degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2009 : Post-Doc, University of Texas at Austin.

2011 : Senior Researcher, Network Division, Samsung Electronics.

2012~2024 : Professor, Hanbat National University.

2024~present : Professor, Hanyang University.