

군집 저궤도 위성과의 지상국 간의 연결 시간 최대화 알고리즘 분석

문태한, *한상민, 신원재

아주대학교 전자공학과, *아주대학교 AI융합네트워크학과

(ansxogks3, *hsm960622, wjshin)@ajou.ac.kr

Analysis of Connection Time Maximization Algorithm for LEO Satellite Constellation Networks

Taehan Moon, *Sangmin Han, Wonjae Shin

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ.

*Department of AI Convergence Network, Ajou Univ.

요약

저궤도 위성의 빠른 이동성을 고려할 때, 군집 저궤도 위성과의 다수의 지상국 간 네트워크 구축 시 지속적인 저궤도 위성 네트워크를 보장하는 연구가 필요하다. 본 논문에서는 저궤도 위성의 빠른 이동성에 의해 발생하는 빈번한 핸드오버에 강인하고 저궤도 위성 네트워크의 연결 시간을 최대화하는 알고리즘에 대해 분석한다. 예측 가능한 위성의 궤도를 활용하여 위성과의 지상국 간 연결 시간을 계산하고, 군집 위성과 지상국들 간 연결 시간의 총합이 최대가 되도록 헝가리안 알고리즘을 적용한다. 모의실험 수행 결과, 예측 가능한 연결 시간 기반 헝가리안 알고리즘은 위성과의 지상국 사이의 최단 거리 기반 연결 그리디 알고리즘보다 지속적인 연결 시간을 더 보장하는 장점이 있다.

I. 연구 배경 및 목적

현재 지구 모든 지역에서 지속적인 통신 서비스 환경 구축을 위해 300~1,500 km 고도의 군집 저궤도 위성을 중심으로 하는 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN)와 관련된 많은 연구가 진행 중이다. 고도 600 km 저궤도 위성은 7 km/s 이상의 빠른 이동성으로 인해 지상국 간의 연결 지속 시간은 약 280초이다 [1]. 이러한 특성으로 저궤도 위성과 지상국은 지상 네트워크보다 현저히 짧은 통신 링크를 가진다. 따라서, 안정적인 군집 저궤도 위성 통신 링크를 구축하기 위해서는 군집 저궤도 위성과 지상국 간 지속적인 연결이 보장되어야 한다. 본 논문에서는 지속적인 연결을 보장하기 위해서 각 위성과 지상국의 연결 지속 시간의 총합이 최대화하는 헝가리안 알고리즘을 활용하여 분석한다. 또한 위성과 지상국 간의 최단 거리 기반 그리디 알고리즘의 결과를 비교함으로써 군집 저궤도 위성 네트워크 연결 시간을 분석한다.

II. 저궤도 위성과의 지상국 간의 연결 지속 시간 분석

위성과 지상국 사이의 연결 시간은 최대 고도각을 통해 계산할 수 있다. 고도각(Elevation angle)은 수평면과 지상국, 위성이 이루는 각을 의미한다. 최대 고도각은 위성과 지상국 사이의 고도각이 가질 수 있는 최대의 고도각을 의미하고, 위성의 궤도와 지상국의 위치에 따라서 최대 고도각은 달라진다. 위성은 정해진 궤도로 지구를 공전하고, 지상국은 위성의 궤도 정보를 알고 있으므로 최대 고도각을 통해 위성과 지상국의 연결 지속 시간을 계산할 수 있다. 고도각을 θ , 최대 고도각을 θ_{\max} 라고 할 때, θ 에서 θ_{\max} 까지의 연결 지속 시간 $\tau(\theta)$ 은 수식 (1)로 계산된다 [2].

$$\tau(\theta) = \frac{1}{w_s - w_E \cos i} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\cos^{-1}(\frac{r_E}{r} \cos \theta) - \theta)}{\cos(\cos^{-1}(\frac{r_E}{r} \cos \theta_{\max}) - \theta_{\max})} \right), \quad (1)$$

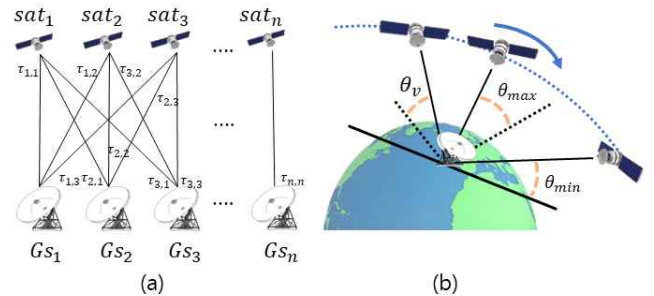


그림 1. (a) 군집 저궤도 위성과의 다수의 지상국 간의 연결 지속 시간 (b) 위성의 위치에 따른 지상국 간의 고도각

r_E 는 지구 평균 반지름, r 은 지구 평균 반지름과 위성 고도(Altitude)의 합, w_s 는 위성의 각속도, w_E 는 지구 각속도, i 는 위성의 궤도 경사각(Inclination)이다.

지상에서 바라본 위성의 궤도는 최대 고도각을 기준으로 대칭 형태를 지니고, 고도각이 최소 고도각 θ_{\min} 보다 낮을 경우 연결은 끊어진다. 그림 1.(b)는 위성과 지상국이 처음 연결 시의 고도각을 θ_v , 연결이 끊어질 시의 고도각을 θ_{\min} 로 나타낸 것이다. 고도각 θ_v 일 때의 시각을 t_v , θ_{\min} 일 때의 시각을 t_e 라고 할 때, 지상국 i 와 위성 j 간의 총 연결 지속 시간 $\tau_{i,j}$ 은 수식 (2)로 계산된다.

$$\tau_{i,j} = t_v - t_e \approx \tau(\theta_v) + \tau(\theta_{\min}). \quad (2)$$

그림 1.(a)는 수식 (2)를 활용하여 군집 저궤도 위성과의 다수의 지상국 간 연결 지속 시간을 이분 그래프(Bipartite graph)로 나타낸 것이다. 각 지상국이 매 순간 하나의 위성과 연결되어 지속적인 위성 네트워크를 보장할 수 있다고 가정한다. 이분 그래프로 제시된 그림 1.(a)은 군집 저궤도 위성 네트워크의 연결 시간 분석 시 헝가리안 알고리즘을 적용하여 저궤도 위성

표 1. 시뮬레이션 파라미터

	Parameters	Value
Satellite	Inclination	53 °
	Altitude	550 km
	Number	6
Ground Station	Location	Seoul, Daejeon, Busan, Jeju, Fukuoka, Yamaguchi
	Minimum elevation angle	25 °

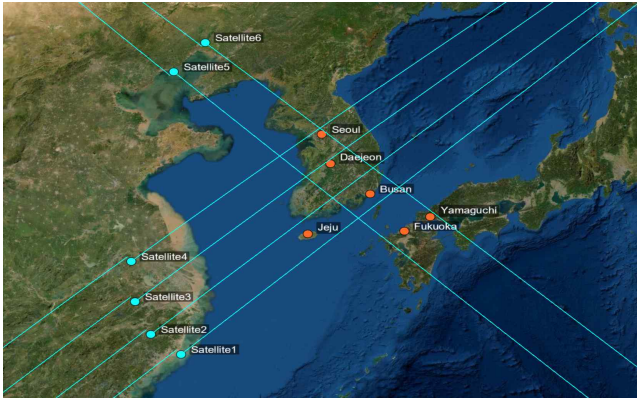


그림 2. 군집 저궤도 위성과 다수의 지상국 배치

과 지상국 간의 총 연결 시간을 최대화할 수 있다. 헝가리안 알고리즘은 각 지상국이 매 순간 하나의 위성과 연결하고, 연결된 위성과 지상국 간의 연결 지속 시간의 총합이 최대가 되도록 한다. 각각 n 개의 위성 and 지상국 간의 연결 시간을 행렬 \mathbf{M} 으로 정리한다. 행렬 \mathbf{M} 의 크기는 $n \times n$ 이고, 행렬 \mathbf{M} 의 원소 $\tau_{i,j}$ 는 i 번째 지상국과 j 번째 위성 간의 연결 시간이다.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \tau_{1,1} & \tau_{1,2} & \tau_{1,3} & \dots & \tau_{1,n} \\ \tau_{2,1} & \tau_{2,2} & \tau_{2,3} & \dots & \tau_{2,n} \\ \tau_{3,1} & \tau_{3,2} & \tau_{3,3} & \dots & \tau_{3,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{n,1} & \tau_{n,2} & \tau_{n,3} & \dots & \tau_{n,n} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

수식 (3)의 행렬 $\mathbf{M}(i,j)$ 을 기반으로 헝가리안 알고리즘을 활용하여 위성과 지상국 간의 총 연결 시간을 분석한다. 헝가리안 알고리즘의 성능 분석을 위해 위성과 지상국 간의 θ_v 일 때 짧은 거리 순으로 저궤도 위성 네트워크를 구성하는 그리디 알고리즘도 수행한다.

III. 모의실험 설계 및 결과

모의실험 상황은 실제 상황을 고려하여 표 1과 같이 여러 궤도에서 공전하는 위성들과 지상국 6개가 배치되며, 모든 위성은 최소 고도각을 만족하는 위치에 있다. 또한, 위성과 지상국 간 네트워크가 모두 끊긴 상황을 가정하며, 지상국은 매 순간 하나의 위성 네트워크와 연결되도록 설계한다. 모의실험 상황은 A, B, C로 분류한다. 각 실험은 한반도 기준으로 북동, 남동 방향으로 공전하는 위성의 개수가 다르다. A는 북동, 남동 방향으로 공전하는 위성을 각각 3개로 설정하고, B는 4개와 2개, C는 2개와 4개로 설정한다. θ_{\min} 은 Starlink에서 사용하고 있는 25°로 설정하고, 위성의 고도는 현재 운용되는 Starlink 위성이 가장 많이 분포하는 550 km로 설

표 2. 시뮬레이션 실행 결과

	헝가리안 알고리즘을 실행한 결과(s)	그리디 알고리즘을 실행한 결과(s)	연결 지속성
A	1543	1339	13.22%
B	1535	1366	11%
C	1539	1372	10.85%

정한다 [3]. 궤도 경사각은 중위도 지역 위성 통신 서비스에 적합한 53°로 설정한다. A, B, C 각각의 경우에서 위성과 지상국들 사이의 연결 지속 시간을 계산하고, 계산된 연결 지속 시간들을 행렬 \mathbf{M} 로 만든 후 헝가리안 알고리즘을 적용한다. 표 2는 MATLAB으로 모의실험을 실행하였을 때, 헝가리안 알고리즘과 그리디 알고리즘을 실행한 결과를 비교한 것이다. 알고리즘 분석 결과, 헝가리안 알고리즘 기반 연결 지속 시간의 총합이 그리디 알고리즘 기반 연결 지속 시간의 총합보다 각각 13.22, 11, 10.85% 만큼의 긴 연결 지속성을 보인다. 위성과 지상국이 연결될 때의 최단 거리 기반으로 네트워크를 구성하는 그리디 알고리즘과 달리, 헝가리안 알고리즘은 위성과 지상국 간의 연결 지속 시간을 기반으로 군집 저궤도 위성 네트워크를 구축하므로 위성과 지상국 간 연결 지속 시간의 총합을 최대화한다. 본 연구 결과를 활용하여, 수천 개의 군집 저궤도 위성과 지상국으로 구성된 NTN을 구축하면 빈번한 핸드오버를 줄일 수 있고, 군집 저궤도 위성 네트워크의 안정적인 연결 시간을 최대화할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 군집 저궤도 위성 and 다수의 지상국 간의 지속적인 연결을 보장하기 위해서 각각의 위성과 지상국 사이의 연결 시간을 헝가리안 알고리즘을 통해 분석한다. 위성과 지상국 사이의 연결 시간은 위성과 지상국 간의 최대 고도각을 통해 수식으로 계산할 수 있다. 이를 기반으로 군집 저궤도 위성과 다수의 지상국 사이의 연결 시간을 이분 그래프로 표현하고, 헝가리안 알고리즘을 활용하여 총 연결 시간 합을 최대화한다. 예측 연결 시간 기반 헝가리안 알고리즘 결과는 그리디 알고리즘에 비해 군집 저궤도 위성 네트워크의 지속적인 연결 시간을 보장한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2021R1A4A1030775)과 정보통신기획평가원(No.2021-0-00467, No.2021-0-00260)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] 3GPP, TR 38.811 v15.1.0, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)," June, 2019.
- [2] I. Ali *et al.*, "Doppler characterization for LEO satellites," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, no. 3, pp. 309–313, March 1998.
- [3] N. Pachler *et al.*, "An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband," in *Proc. IEEE ICC Workshops*, 2021, pp. 1–7.