

# 스타링크 모델에서 경사각과 phase factor 분석 : 뉴욕-서울 ISL 시뮬레이션

백수빈, 최지환  
한국과학기술원 항공우주공학과  
{havenbaek, jhch}@kaist.ac.kr

## Inclination and Phase Factor Impact on Starlink's Network : A Case Study of ISL Simulation between New York and Seoul

Subin Baek, Jihwan Choi  
Dept. of Aerospace Eng., KAIST

### 요약

스타링크의 워커 델타 군집 모델을 사용하여 뉴욕과 서울 간의 통신 시뮬레이션을 통해 저궤도 위성 네트워크에서 경사각(inclination)과 위상 인자(Phase Factor)가 ISL 지연 시간에 미치는 영향을 분석하였다. 타겟 서비스에 적합한 경사각과 위상 인자를 선택함으로써 네트워크 성능의 변동성을 최소화하고 효율적이며 신뢰성 높은 통신 서비스를 제공할 수 있다. 이러한 분석은 지역 특화된 위성 군집 모델 설계 및 배치, 라우팅 전략 수립에 유용한 정보를 제공한다.

### I. 서론

지상 네트워크는 지형지물과 자연환경에 의해 직선에 가까운 경로를 형성할 수 없어 자유도가 낮다. 하지만 위성 네트워크는 지리적, 환경적 제약을 극복하고 넓은 커버리지를 제공함으로써 지상 네트워크에 비해 높은 자유도와 유연성을 가진다. 따라서 대륙간 통신의 경우 지상망 대비 낮은 전파 지연 시간을 제공하며, 보다 빠른 통신을 지원할 수 있다.

정지궤도 위성 대비 저궤도 위성의 제한된 커버리지 문제를 해결하기 위하여, 다양한 고도와 여러 위성 궤도면에 대하여 대규모로 위성을 배치하는 Mega-Constellation 구조가 도입되었다. 또한 OBP(On-Board Processing) 기능을 통해 위성에서 데이터 처리가 가능해지며 위성 간 링크를 활성화하여 위성들을 서로 연결하고, 레이저의 고속 전송 속도를 활용한 저궤도 위성 네트워크가 활발히 연구되고 있다.

위성 군집 모델에서 가장 많이 사용되는 두 모델은 원웹이 사용 중인 walker-star 모델과 스타링크가 사용 중인 walker-delta 모델로 구분할 수 있다. 워커 스타 모델은 경사각 90 도를 갖는 궤도들의 RAAN 을 균등하게 배치하며, 극지방을 포함한 커버리지를 갖는다. 반면 워커 델타는 경사각 40~60 도의 평면에 위성을 배치하여, 인구 밀집 지역에 집중된 가시성 및 커버리지를 제공한다. 워커 델타 모델은  $i:t/p:F$  로 표현되는데, 각각 궤도 경사각(i), 전체 위성 수(t), 궤도 평면 수(p), phase factor(F)이다.

같은 위성 수와 궤도 평면 수를 갖더라도, 경사각과 phase factor 변화에 따라 위성 간 거리는 달라진다. Phase factor 의 경우, 인접 궤도와 위성의 위상 차를 나타내기 때문에 인접 궤도 위성과의 거리에 가장 큰 영향을 미치고, 마지막 궤도와 첫 번째 궤도를 연결할 때 위성 선택의 문제 역시 고려해 주어야 한다. 또한, 궤도

경사각이 커질수록 같은 수의 위성으로 더 넓은 영역을 커버하기 때문에 위성 간 거리가 멀어진다.

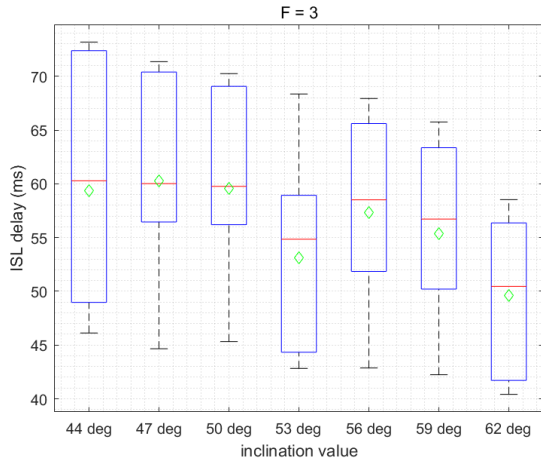
전파 지연이 지배적인 위성 환경에서 위성 간 거리는 곧 네트워크 비용이 되므로, 서비스 주요 지역에 효과적으로 적용될 수 있는 위성 배치가 필요하다. 불필요한 서비스 범위를 최소화하고 지역의 특성이나 요구사항에 집중하여, 더 비용 효율적인 방식으로 서비스할 수 있다.

본 논문에서는 워커 델타 군집 모델에서 경사각과 phase factor 의 변화가 ISL 지연 시간에 어떤 영향을 미치는지 분석한다. 특히 스타링크가 사용하는 위성 군집 모델을 사용하여 한반도의 데이터 서비스하는 경우를 중심으로 지연시간 기반의 성능을 비교하였다. 이 분석을 통해 해당 변수에 따른 네트워크 성능 변화를 파악하고, 한반도를 예시로 특정 지역에 맞춤형 위성 배치를 위한 근거를 파악하는데 도움을 주고자 한다.

### II. 본론

뉴욕과 서울에서 데이터 트래픽 전송 상황을 가정하였다. 뉴욕 맨해튼에 위치한 CoreSite (32 Avenue of the Americas) 게이트웨이를 사용하였으며, 위경도 주소는 40.7204°N, 74.0047°W 이다. 서울은 상암동에 위치한 KT IDC 게이트웨이를 사용하였으며, 위경도 주소는 37.5793°N, 126.8928°E 다. 위성망에서는 각 게이트웨이에서 최소 고도각 30°를 만족하는 연결 가능한 위성 중 가장 가까운 위성을 선택하여 source 와 target 위성으로 설정하였다.

스타링크의 phase 1 버전 3 의 위성 군집 모델은 53°:1584/72:f walker-delta 군집 모델[1]을 사용하며, phase factor 는 알려지지 않았다. ISL 은 동일 궤도 내 2 개, 인접 궤도와 1 개씩 하여 총 4 개를 연결하는 토폴로지로 구성하였다.



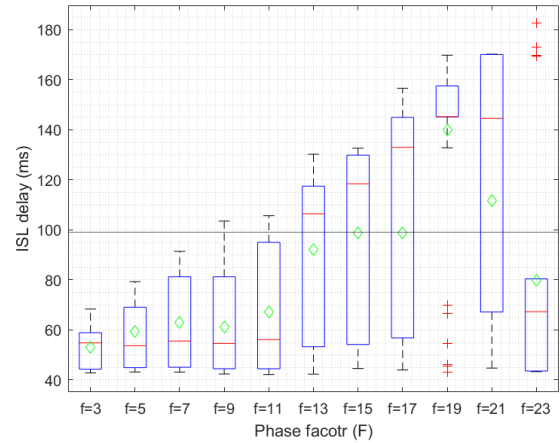
뉴욕과 서울을 지상 네트워크로 연결할 때, 데이터 트래픽은 해저 광케이블(fiber optics)을 통해 태평양을 횡단한다. 이때 11,062km의 거리를 200,000m/s에서 55.87% 감소된 111,740km/s의 속도로 이동한다. 전체 지연 198.17ms 중 전파지연은 평균적으로 99ms이며 0.11의 jitter 값을 갖는다[2]. Fig.1은 F=3에서 궤도 경사각을 다르게 하여 전파지연을 비교한 시뮬레이션 결과이다. 스타링크에서 사용하는 궤도 경사각 53°에서 평균 59.58ms의 전파지연을 보이며, 최대 68.35ms, 최소 42.87ms, jitter는 6.23이다. 지상망 대비 31.65ms 감소하여 32% 더 빠른 속도로 데이터를 전송할 수 있다. 이를 통해 ISL을 활용할 경우, 글로벌 통신 및 대륙간 장거리 통신에서 지상망 대비 훨씬 빠르고 효율적인 통신을 이뤄낼 수 있음을 나타낸다.

동일한 위성 수와 궤도 수를 갖더라도, 궤도 경사각에 따라 ISL을 활용한 지연시간이 다르다. 뉴욕과 서울이 커버리지 안정권에 들어오도록, 스타링크가 선택한 53도에서 3도 간격으로 비교하였다. 중앙값은 50~60ms 사이이며 목적지나 출발지의 위도와 가까운 경사각을 가지면 변동성이 커지는 경향이 있다. 경사각이 높아지면 위성은 지구의 더 넓은 지리적 영역을 커버하여 더 많은 지역을 효과적으로 서비스하지만, 위성 간 거리가 증가한다. 그럼에도 불구하고 경사각이 53도와 62도로 높더라도 더 효율적인 네트워크를 구성할 수 있다.

선정한 F에 따라서도 지연시간은 달라질 수 있다. F가 클수록 위성이 같은 범위 안에서 고르게 분포하기 때문이다. Fig.2는 F값에 따른 ISL 지연시간 변화를 나타낸다. F=0의 경우, 선택한 궤도 내 위성 수에 따라 마치 지구를 가로선으로 나눈 듯한 위성 배치가 이루어지기 때문에, 해당 선이 생기는 위도 지역 간의 트래픽 교환이라면 좋은 성능을 보이지만, 그 외 지역에서는 높은 지연 시간을 보일 것이다. 전반적으로 F가 증가할수록 ISL 지연의 변동성이 증가한다. 이는 F값이 클수록 위상 차가 커지므로 궤도간 연결 거리는 길어지기 때문이다. ISL에서 궤도간 이동은 맨하탄에서 수평 이동에 해당하는 움직임을 기대하지만, F가 커질수록 수평 이동에 감내해야 하는 수직 이동이 더 커진다. 이에 따라 경로 상 수평 이동을 얻어내기 위해 불필요하게 이루어진 수직 이동을 보상하기 위한 비효율적인 경로가 추가된다. 이런 이유로, 선정한 F에 따라 지상망보다도 느린 경로가 생성될 수 있다.

### III. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성 네트워크에서 경사각과 phase factor의 변화가 ISL 지연 시간에 미치는 영향을



분석하였다. phase factor가 증가함에 따라 지연 시간의 변동성이 증가하는 경향을 보이며 네트워크 성능이 예측이 어려워진다. Inclination은 출발지와 도착지의 위도에 영향을 받으므로 경향성 파악은 어렵지만 최적의 성능이 나타나는 위도가 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 지역 특화된 위성 군집 모델 설계 및 배치와 라우팅 전략을 수립하는 데 참고로 활용될 수 있다. 같은 수의 위성으로도 경사각과 phase factor 선정에 따라 그 성능이 크게 달라지므로, 분석을 통해 변동성이 낮아 안정적인 성능을 보장할 수 있는 파라미터를 효과적으로 선정하여 효율적이고 신뢰성 높은 통신 서비스를 제공해야 함을 시사한다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2024년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2069728)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

### 참고 문헌

- [1] SpaceX FCC update, "SpaceX non-geostationary satellite system, attachment A, technical information to supplement schedule S," Apr. 2020. Accessed: Dec. 6, 2023.
- [2] WonderNetwork, "Ping times from New York," Available: <https://wondernetwork.com/pings/New%20York>