

워커-델타 기반 저궤도 위성군의 커버리지 및 ISL 협력 전송 효과에 관한 연구

정길수, 심은석*, 노유정**, 이준세***

국방과학연구소, *한화시스템, **성신여자대학교, ***성신여자대학교

ksjeong@add.re.kr, *eunseok.shim@hanwha.com

20221353@sungshin.ac.kr, *junselee@sungshin.ac.kr

A Study on the Coverage and Cooperative ISL Transmission Effects of Walker-Delta Based LEO Satellite Constellations

Kil-Soo Jeong, Eun-Seok Shim, Yu Jong Roh, Junse Lee***

Agency for Defense and Development, *Hanwha System,

Sungshin Women's Univ., * Sungshin Women's Univ

요약

본 논문은 한반도 전역에서 SNR 기반 Coverage 를 만족하는 최소 LEO 위성 수 산출을 목표로, 워커 델타 (Walker-Delta) 궤도 모델을 기반으로 커버리지 만족을 위한 위성군 설계 기법을 제안한다. 자유공간 경로손실, 대기 감쇠, 페이딩을 포함한 현실적 채널 모델을 적용하였으며, 위성 간 링크(ISL)의 존재 여부에 따라 공동 전송(Joint Transmission)을 활용한 커버리지 향상 가능성을 검토하였다. 시뮬레이션 결과, ISL 이 없는 경우 동일 커버리지 달성을 위해 더 많은 위성이 필요하나, ISL 기반 협력 통신을 적용할 경우 약 40~70%의 위성 수 절감 효과를 확인하였다. 본 연구는 한반도 전역의 연속 커버리지를 달성하기 위한 효율적 궤도 설계 방안을 제시한다.

I. 서론

저궤도(LEO, Low Earth Orbit) 위성 통신망은 광역 커버리지와 저지연 특성으로 인해 차세대 통신 인프라로 주목받고 있다 [1]. 특히 한반도와 같이 군사 및 재난 대응 및 감시 수요가 높은 지역에서는 시간에 따라 연속적인 커버리지를 확보하는 것이 중요하다. 그러나 기존 연구들은 전 지구(Global) 커버리지를 중심으로 설계되어 특정 지역 전용 위성군 설계에는 한계가 있다.

이에 본 논문은 한반도 전역을 대상으로, SNR 기반 커버리지를 만족하는 최소 위성 수와 궤도 파라미터를 도출하는 프레임워크를 제안한다. 특히 워커-델타(Walker-Delta) 구조를 기반으로 궤도면 수(P), 고도(h), 경사각(i) 등의 변수에 따른 커버리지 특성을 분석하며, 위성 간 링크(ISL)을 통한 협력 전송이 커버리지 성능에 미치는 영향을 평가한다.

II. 본론

2.1 워커-델타 기반 위성군 모델

워커-델타 위성군은 동일한 고도와 경사각을 가지는 원형 궤도면에 위성을 균등 간격으로 배치하는 구조로, 주요 파라미터는 (궤도면 수 P, 위상 보정 인자 F, 고도 h, 경사각 i)로 정의된다 [2]. 본 연구에서는 한반도 전역(위도 33~43°, 경도 124~132°)을 대상으로, 일정 시간 동안 모든 지점이 최소 1 개 위성을 관측할 수 있는지를 평가하였다.

2.2 채널 및 SNR 모델

LEO 위성과 지상 단말 간의 수신 SNR 은 다음과 같이 모델링한다.

$$SNR_{j,x} = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi d_{j,x} f_c/c)^2 N_0 B} L_{atm}^{-1} L_{fading}^{-1} \quad (1)$$

여기서, $d_{j,x}$ 는 j 번째 위성과 단말 x 사이의 거리, L_{atm} 은 ITU-R P.676 기반의 대기 감쇠, L_{fading} 은 Rician 분포 기반 페이딩 손실을 나타낸다 [3,4].

또한, 임계 SNR (γ_{th}) 이상을 만족하는 지점을 커버리지 내로 정의한다. 한반도 전역의 임의의 위치를 x 라 하고, 시각 t 에서 위성 j 로부터 수신된 SNR 을 $SNR_{j,x}(t)$ 라 할 때, 요구 최소 SNR 임계값 이상의 신호를 전달하는 위성의 집합을 다음과 같이 정의한다.

$$V_x(t) = \{j | SNR_{j,x}(t) \geq \gamma_{th}\}$$

즉, $V_x(t)$ 는 시간 t 에 지상의 지점 x 에서 통신 가능한 위성들의 집합이다.

2.3 ISL 기반 협력 전송 모델

ISL(Inter-Satellite Link)은 위성 간 데이터 공유를 가능하게 하며, 단일 위성과의 링크 품질이 낮은 경우에도 다중 위성 협력 전송을 통해 수신 SNR 을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 ISL 을 활용하여 위성 간에 최대비결합(Maximal Ratio Combining, MRC), 그리고 공동 전송(Coherent Joint Transmission, JT) 방식을 고려하였다.

최대비결합(MRC: Maximal Ratio Combining)의 경우, $V_x(t)$ 에 포함된 여러 위성의 신호를 합성한다. 이 때, 비위상적으로 합성을 하고, 각 링크의 페이딩 계수가 서로 독립이라 가정하면, 수신 SNR 은 개별 링크 SNR 의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$SNR_x^{MRC}(t) = \sum_{j \in V_x(t)} SNR_{j,x}(t) \quad (2)$$

즉, 각 위성으로부터 수신된 신호 전력의 누적 효과를 통해 총 SNR 이 향상된다. MRC 는 구현이 단순하고, 위상 정합이 불필요하다는 장점이 있으나, 비위상 결합으로 인해 합성 이득이 작다.

공동 전송(JT: coherent Joint Transmission) 방식에서는 각 위성이 동일한 파형을 위상 정합 형태로 송신하여, 위상과 주파수가 일치하도록 정렬된 신호가 합성되어 전력의 단순 합이 아닌 진폭의 합에 비례하는 제곱 이득을 얻는다. 수신 SNR 은 다음과 같이 표현된다.

$$SNR_x^{JT}(t) = \left(\sum_{j \in V_x(t)} \sqrt{SNR_{j,x}(t)} \right)^2 \quad (3)$$

이 경우, 모든 위성이 동일한 데이터를 송신하면서 보강 간섭을 형성하므로, MRC 보다 더 큰 이론적 SNR 이득을 제공한다. 단, 위성 간 시간 위성 동기화 및 채널 상태 정보의 공유가 요구되며, 운영 복잡도가 증가한다.

ISL 을 통한 협력 전송은 단일 링크 기반 통신 대비 수신 SNR 및 커버리지 확장 측면에서 뚜렷한 이점을 제공하며, 이 중 JT 는 MRC 대비 추가 이득이 기대되어 동일 커버리지 유지시 필요한 위성 수를 절감할 수 있을 것으로 기대되지만 구현 복잡도가 더 증가하게 된다.

2.4 모의 실험

모의 시험은 궤도 고도 $h=1500$ km, 워커-델타 위상 인자 $F=1$, 반송 주파수 $f=20$ GHz (Ku/Ka 경계대역), 송신 전력 =10 dBW, 송·수신 안테나 이득 $G_t=G_r=26$ dBi, 노이즈 대역폭 $B=30$ MHz, 요구 SNR 임계값 3 dB, Rician K-인자 3 dB, 그림자 페이딩 평균과 표준편차 (3 dB, 4 dB), 및 경량 대기 감쇠 모델을 적용하였다. 모든 위성은 가시 환경으로 설정하여 clear-sky 조건을 모사하였다. 12 시간 동안 60 분 간격으로 모의 실험을 수행하였고, 각 (i, P) 조합에 대해 궤도 평면당 위성 수를 증가시키며 커버리지율 $\geq 95\%$ 를 만족하는 순간의 궤도 평면당 위성 수를 통해 총 위성 수를 산출하였다.

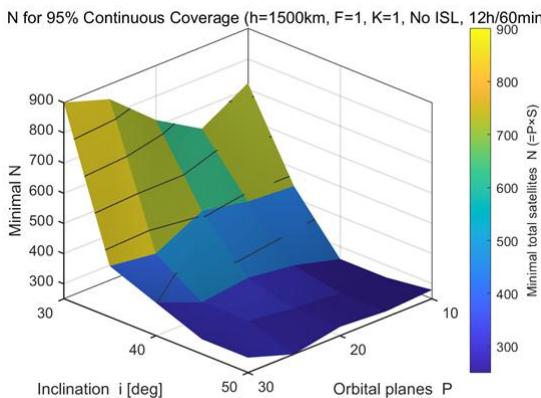


그림 1. i 와 P 에 따른 95% 커버리지를 만족하는 최소 위성 수 (N)

그림 1 은 RF 예산(RF budget) 및 궤도 기하 조건 하에서 95% 연속 커버리지를 확보하기 위해 요구되는 총 위성 수의 변화를 나타낸다. 위성군의 기하적 분포와 링크 예산이 상호 작용하면서 i 와 P 에 따른 위성 수 요구량이 달라지는 양상을 보인다. 경사각이 30° 에서 50° 로 증가함에 따라 동일한 커버리지 조건을 충족하기 위해 필요한 위성 수가 점진적으로 감소하는 경향을 보인다. 반면 궤도면 수 P 가 증가하면 위성의 경도 분포가 균일해지면서 노드 간 간극이 줄어들어 커버리지가 개선된다. 따라서 P 가 10에서 30으로 증가하는 구간에서는 급격한 위성 수 감소가 나타난다. 전체적으로 $(i, P) = (30^\circ, 10)$ 근방에서는 약 900 개의 위성이 요구되지만, $(i, P) = (50^\circ, 35-40)$ 구간에서는 약

300 개 수준으로 감소한다. 만약 대기 감쇠가 심한 환경이나 안테나 이득이 낮은 경우를 가정하면, 동일 커버리지율을 달성하기 위해 요구되는 위성 수는 전체적으로 증가하게 된다.

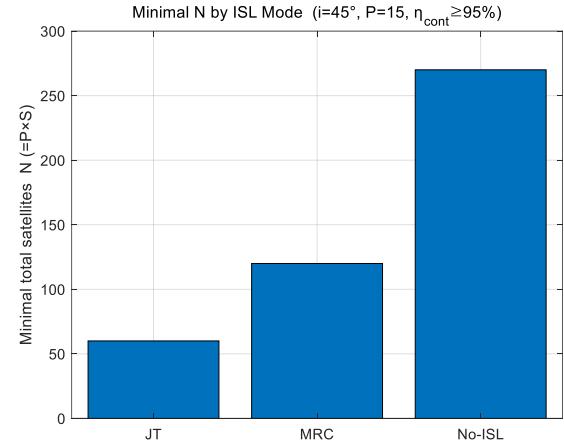


그림 2. $i = 45^\circ$, $P = 15$ 에서의 협력 통신 성능 비교

그림 2 는 $i=45^\circ$, $P= 15$ 에서 협력 전송 기법 적용여부에 따른 연속 커버리지 성능을 비교하였다. 그 결과, No-ISL 95% 연속 커버리지를 달성하기 위해 약 $N=280$ 개 수준의 위성이 필요했으나, MRC 에서는 약 $N=160$ 개로 감소하였다. 또한, 위상 정이 가능한 JT 모드에서는 $N=80$ 개의 위성만으로 동일한 커버리지 목표를 만족할 수 있었다. 즉, 협력 전송의 공간적 결합이 위성 수를 약 40-70% 절감시키는 결과를 보였다.

III. 결론

본 논문은 워커-델타 기반 LEO 위성군의 SNR 기반 커버리지 만족을 위한 위성군 파라메터 저궤도 위성군 설계 방안을 제시하였다. 현실적 채널모델과 ISL 협력 전송을 반영한 결과 연속 커버리지율이 크게 향상되고 동일 커버리지 만족을 위한 요구 위성 수를 줄일 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 위상 동기화 오차 및 빔포밍 제약을 반영한 신시간 ISL 네트워크 최적화로 확장할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소, 한화시스템(주)의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업임(UI247023TF).

참 고 문 헌

- [1] S. Liu, "LEO satellite constellations for 5G and beyond: How will they reshape vertical domains?," IEEE Communications Magazine 59.7 (2021): 30-36.
- [2] J. G. Walker, "Satellite Constellations," Journal of the British Interplanetary Society 37 (1984): 559
- [3] Series, P. "Attenuation by atmospheric gases and related effects." Recommendation ITU-R 25 (2019): 676-12.
- [4] A. Goldsmith, "Wireless communications." Cambridge university press, 2005.