

저궤도위성 기반의 군통신체계를 위한 최소위성 궤도군 설계

조성환, 이호찬, 박복기, 김용철¹⁾

육군사관학교

scho@kma.ac.kr, channy64@kma.ac.kr, masca27@kma.ac.kr, kyc6454@kma.ac.kr

Design of a Minimal Satellite Constellation for a Low-Earth Orbit Based Military Communication System

Sunghwan Cho, Hochan Lee, Pokki Park, Yongchul Kim

Korea Military Academy

요약

위성은 현대 및 미래 전쟁에서 중추적인 역할을 할 것으로 기대되며, 이에 따라 많은 군사 선진국들이 전쟁에서 다양한 위성 기술과 무기 체계의 활용에 주목하고 있다. 대한민국 군도 감시, 정찰, 통신을 위한 군사용 위성 개발에 상당한 노력을 기울이고 있다. 특히 저궤도 위성 통신은 높은 전송 속도, 낮은 지연 시간, 저전력 등의 장점을 가지고 있어 군사 작전에 매우 유용하다. 그러나 저궤도 위성을 활용한 지속적인 통신망 구축을 위해서는 상당한 수의 위성이 필요하며, 이는 막대한 예산과 고도의 기술적 요구를 수반한다. 따라서 본 논문에서는 한반도 지역에 필요한 저궤도 통신 위성군을 구성하는데 필요한 최소 위성 수를 계산하는 알고리즘을 제시한다. 구형 삼각법에 기반한 지상 커버리지를 고려한 최적화 문제를 설정하고 그 해답을 제시한다. 제안된 방법에 따르면, 약 1,000km 상공에서는 대략 156개의 위성이 필요하다고 계산된다.

I. 서론

많은 선진국들이 군 전용 위성뿐만 아니라 상용 저궤도 위성을 군사적 목적으로 활용하는 데 관심을 기울이고 있다. 상용 위성의 활용은 군사보안에 대한 우려가 있음에도 불구하고, 민간 영역의 기술을 신속하게 도입하고 유지보수 비용을 절감할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 저궤도 위성군을 구축하고 유지하는 데는 막대한 예산이 필요하며, 군 전용 위성 사용은 국가 안보와 군사적 요구를 고려하여 상세한 비용 분석과 사용 효과 평가가 필요하다 [1]. 이에 본 논문은 한반도 지역에서 필요한 저궤도 위성군의 최소 위성 수를 추정하고, 이를 위한 위성군 설계 방법을 제시한다. 이러한 연구는 군 전용 저궤도 위성 확보와 상용 저궤도 위성의 군사적 활용성 검토에 중요한 근거를 제공할 것이다.

II. 본론

그림 1은 저궤도 위성군 설계를 위한 기하학 구조를 보여주고 있다. 먼저 그림 1(a)는 하나의 위성이 커버할 수 있는 지역을 보여주고 있다. 고도 h 에 위치한 위성은 하이라이트 된 영역을 통신 지원할 수 있으며, 이 영역은 지구 중심에서 측정된 각도 θ 로 표현된다. σ 는 위성이 지상을 관측할 수 있는 고도각으로서 위성이 σ 보다 높은 각도에 위치해야만 통신 지원이 가능함을 의미한다. 지구 반지름이 R_E 라고 가정하였을 때 각 값의 관계는 다음과 같이 정리된다.

$$h = R_E [\cos \sigma / \cos(\theta + \sigma) - 1] \quad (1)$$

여러 개의 위성이 한 궤도 안에 일정한 간격으로 배치되어 있을 때, 이 위성들이 지속해서 관측할 수 있는 지구상의 지역, 즉 그림 1(a)의 음영 처리된 부분을 연속적으로 표현하면 그림 1(b)와 같이 그려진다. 그림 1(b)에서 한 원 안에 있지만 색칠되지 않은 부분은 어떤 한 위성이 어느 한순간에는 관찰할 수 있지만, 위성이 이동함에 따라 관찰할 수 없는 시간도 존재하는 지역이 된다. 한편, 하이라이트 처리된 벨트 모양의 지역은 궤도상의 존재하는 위성들에 의해 중단없이 연속적으로 관측 가능한 지역이 된다. 여기서 색칠된 벨트의 절반 각도 폭을 ψ 라고 한다면 구형 삼각법을 활용하여 그림 1(a)에서 정의되었던 θ 와 궤도당 위성의 개수 n_2 과 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다 [2].

$$\cos \theta = \cos \psi \cos(\pi/n_2) \quad (2)$$

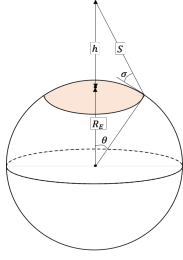
이 논문에서의 위성군 설계의 가장 기본적인 개념은 지구상에서 항상 통신 지원해야 하는 지구 위도의 범위를 그림 1(b)에서 음영 처리된 커버리지 벨트를 n_1 개 만큼 사용하여 모두 덮어줄 수 있는 위성군을 찾는 방식이다 [2]. 여기서 위성군 설계에는 궤도의 개수 n_1 , 궤도의 기울기 i , 궤도당 위성의 개수 n_2 , 위성의 고도 h , 최저 관측 가능 각도 σ 등이 포함된다.

그림 1(c)에는 위성 궤도에 따른 지상에서의 커버리지를 보여주고 있다. 확대 그림에서 확인할 수 있듯이 점 V 는 연속으로 중단없이 관측 가능한 가장 최남단 지점으로써 점 S 와 T 에서 끝나는 관측되지 않는 지역의 교차점에서 형성되게 된다. 점 V 의 상하 위치에 따라 언제나 위성이 볼 수 있는 위도 영역의 최솟값인 λ 가 결정된다. 또한, 점 N 은 (1), (2)번 궤도에 있는 위성이 연속해서 볼 수 있는 최상단 지점으로써, 연속해서 위성이 볼 수 있는 위도 영역의 최댓값인 μ 를 결정한다. 식 (1), (2)를 이용하여 θ 를 없애고, 그림 1(c)에서 설명된 기하구조에 구면 삼각법을 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

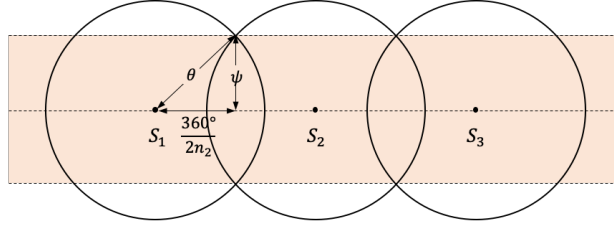
$$h = R_E (\cos \sigma / \cos \arccos [\cos(\pi n_1 / N_s) \cos \psi] + \sigma - 1) \quad (3)$$

$$\lambda = \arctan \left\{ \tan i \cos \left[\left(\frac{p+1}{n_1} \right) \pi \right] \right\} - \arcsin \left(\frac{\sin \psi}{\sqrt{1 - \sin^2 i \sin^2 \left\{ \left(\frac{p+1}{n_1} \right) \pi \right\}}} \right) \quad (4)$$

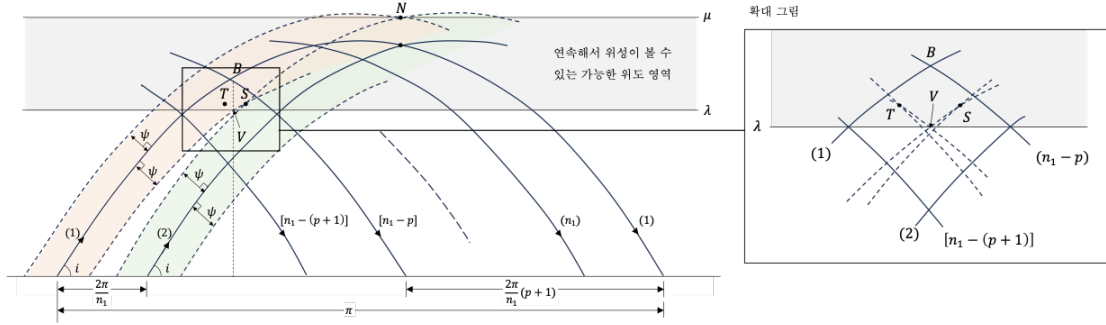
$$\psi = \arcsin [\sin \mu \cos i - \cos(\pi/n_1) \cos \mu \sin i] \quad (5)$$



(a) 한 위성이 볼 수 있는 영역



(b) 여러 개의 위성에 의해 연속적으로 관측 가능한 구형 상의 지역



(c) 궤도에 따른 지상에서의 커버리지

그림 1. 위성군 설계를 위한 기하구조

여기서 p 는 아래의 조건을 만족하는 최소 정수이다.

$$p \geq \frac{n_1}{2} - 2 - \frac{n_1}{\pi} \arctan \left[\frac{\cos i}{\sin \psi} \sqrt{\frac{\cos^2 \psi}{1 - \sin^2 i \sin^2(\pi/n_1)} - 1} \right] \quad (6)$$

식 (3)~(6)의 관계를 이용하여 요구되는 성능을 위성군을 설계하기 위한 다음과 같은 최적화 문제를 만들 수 있다.

$$\min_{n_1, n_2, i, \mu, \sigma} N \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & 0^\circ \leq i \leq 90^\circ \\ & 0^\circ \leq \lambda \leq \gamma_\lambda < \mu \\ & \gamma_\mu \leq \mu \leq 90^\circ \\ & \gamma_\sigma \leq \sigma \leq 90^\circ \\ & 0 \leq h \leq \gamma_h \end{aligned} \quad (7b)$$

(7) 최적화 문제의 솔루션을 구해 그림 2와 같이 위성군의 고도각에 따라 최소한으로 필요한 위성을 개수를 나타내었다. 위성군의 고도가 높아질수록 더 적은 개수의 위성이 필요한 것을 확인할 수 있다. 또한, 고도각 σ 에 따라 고도에 따른 위성의 개수가 크게 변화함을 확인할 수 있다. 같은 100개의 위성으로 $\sigma = 20^\circ$ 일 때는 약 800km의 고도의 위성군의 설계가 가능하나, $\sigma = 40^\circ$ 의 경우에는 상대적으로 높은 고도인 약 1,800km 높이의 위성군 설계가 가능하다. 이는 저궤도 위성군을 설계할 때 요구되는 군 통신위성이 요구하는 고도각에 따라 필요한 위성의 개수가 크게 달라진다는 것을 의미한다. 예를 들어, 산악지형이 많은 한반도에서 원활한 통신을 지원하기 위해서는 높은 수준의 σ 가 요구될 것으로 예상하며, 이는 더 많은 위성을 포함하는 위성군 설계가 필요하다는 것을 의미한다.

III. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성통신에 기반한 군 통신체계를 구축함에 있어 필요한 고도에 따른 최소 위성의 개수를 구하는 알고리즘을 제안하였다.

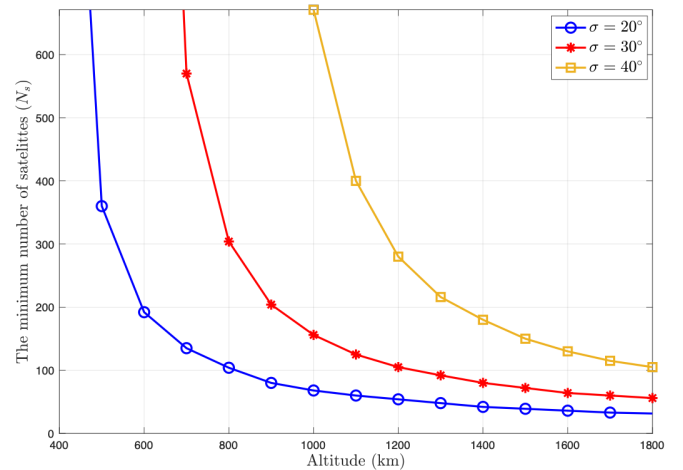


그림 2 고도에 따른 최저 필요 위성 개수 ($\gamma_\mu = 45^\circ$, $\gamma_\lambda = 30^\circ$)

상용에서 지구 전지역을 대상으로 서비스 중인 OneWeb의 600여 개(고도 1,200km), SpaceX의 12,000여 개(550km)에 비교하여 우리나라 지역에 대해서만 지원할 경우 상대적으로 적은 수의 위성으로 통신망 구축이 가능함을 보여주었다. 이러한 분석 결과를 통해 군 전용 위성 확보 추진 시 정확한 비용 계산이 가능할 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 작성된 논문임(No. 2022R1G1A100322612).

참고 문헌

- [1] 조성환 등, “상용 저궤도 위성 통신의 군사적 활용 방안”, 2023 하계종합학술발표회 논문집, 한국통신학회, 2023년 6월.
- [2] R. D. Luders. “Satellite Networks for Continuous Zonal Coverage.” Aerospace Research Central Journal, vol. 31, no. 2, pp. 179-184, 1961