

안테나 자세 변화에 따른 정지궤도 기반 보강위성의 가시성 분석

장석원, 최재건, 박지운, 안우근, 박용준*, 김태오*

국방과학연구소, *(주)단암시스템즈

feldspar1@add.re.kr, jgchoi@add.re.kr, kiw9299@add.re.kr, wgahn@add.re.kr,

*yjpark@danam.co.kr, *kimto@danam.co.kr

Visibility Analysis of GEO-based Augmentation Satellites According to Antenna Attitude Rotation

Jang Suk Won, Choi Jae Gun, Park Ji Woon, Ahn Woo Geun,

Park Yong Jun*, Kim Tae O*

Agency for Defense Development, *Danam Systems

요약

GNSS 시스템에서 정지궤도 기반 SBAS 위성은 고정된 위치 특성으로 인해 무기체계의 자세 변화에 따라 안테나의 가시성이 제한될 수 있다. 본 연구에서는 자세변환행렬을 기반으로 안테나 시야 방향과 위성 간의 기하학적 관계를 분석하고, 요각을 변수로 설정하여 가시성이 확보되는 물각과 피치각의 해석적 범위를 도출하였다. 또한 2축 rate table을 이용한 시험을 통해 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 이러한 분석은 안테나 배치 최적화와 임무 기획에 유용하며 GNSS 시스템의 운용성 향상에 기여할 수 있다.

I. 서론

다양한 무기체계에서는 정확한 위치 및 시간 정보를 획득하기 위해 GNSS 시스템을 사용하고 있으며, 오차 보상을 위해 정지궤도 기반의 SBAS 위성으로부터 위성 신호를 수신한다. 그러나 무기체계 운용 중 발생하는 자세 기동에 의해 안테나의 시야 각은 제한되며, 이로써 위성의 가시성이 저하된다. 이는 필연적으로 항법 오차를 증가시켜 무기체계의 정확도를 떨어뜨리게 된다.

특히, SBAS 위성은 일반 GNSS 위성에 비해 상대적으로 고정된 위치(GEO 궤도)를 유지하기 때문에, 특정 자세에서는 가시 영역 밖으로 벗어날 가능성이 존재한다. 따라서, 다양한 자세에서 특정 위성의 가시 여부를 평가하고, 안테나 배치 또는 임무 기획의 기준을 마련하는 것은 매우 중요하다.

본 연구의 목적은 GNSS 시스템의 안테나 자세 변화에 따라서 자세변환행렬을 기반으로 특정 위성(SBAS)의 가시성 여부를 정량적으로 분석하고, 이를 바탕으로 GNSS 시스템의 운용성 향상 및 정밀한 항법 정보 제공의 연속성 확보에 있다.

크, Y축으로 θ 만큼, 다시 X축으로 ϕ 만큼 연이어 회전한 것으로 가정하면, 동체의 수평면에 대한 법선벡터는 자세변환행렬에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}$$

Figure 1에 수평면과 회전운동에 따른 GNSS 안테나의 수평면과 각 수평면의 법선벡터가 도시되어 있다. 두 법선벡터($[0,0,1]$, n)에 수직인 벡터는 벡터 곱에 의해 $[n_y, -n_x, 0]$ 가 된다. 이 벡터는 Figure 1의 왼쪽 그림에서 두 수평면들의 교선에 놓이게 된다.

Figure 1의 오른쪽 그림은 교선 방향에서 바라본 그림으로 두 평면이 이루는 각 α 는 두 법선벡터의 내적에 의해 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$\cos \alpha = \cos \phi \cos \theta$$

II. 본론

1. 자세 변화에 따른 가시 영역 분석

GNSS 시스템의 안테나는 일반적으로 수평면 위의 위성들의 신호를 수신하게 된다. 무기체계가 롤, 피치, 요로 표현되는 회전운동을 하게 되면, 안테나의 수평면 또한 변화하게 된다.

무기체계가 회전운동을 한 이후의 수평면은 동체 좌표계의 XY 평면이며, 이 평면의 법선벡터는 회전된 Z축 벡터이다. 동체가 회전을 Z축으로 ψ 만

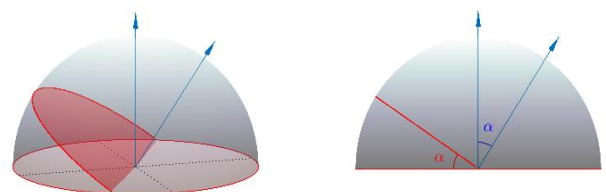


Figure 1 자세변환에 의한 수평면과 법선벡터

코사인함수는 예각의 범위에서 1이하의 양수 값을 갖는 감소함수이므로
 톨각과 피치각을 구분하지 않고 두 각 중 큰 각을 ζ 라고 하면, 위 식으로
 부터 $\alpha \geq \zeta$ 가 된다.

그림에 표현되어 있지는 않지만, 교선에 수직한 방향의 동경을 β 라고 하
 면, 두 법선벡터는 동경이 β 인 수직면에 포함되며, β 는 다음 관계를 만족
 한다.

$$\tan \beta = \tan \left(\psi - \tan^{-1} \left(\frac{\sin \phi}{\cos \phi \sin \theta} \right) \right)$$

이와 같은 관계에 의해 동체의 자세 변화에 따른 가시 영역은 동경 β 를
 기준으로 고각이 α 이상인 범위가 된다.

2. 고정 위성에 대한 가시성 분석

정지궤도를 갖는 SBAS 위성과 같이 지구에 대한 상대위치가 일정한 위
 성의 경우 이 위성에 대한 가시성은 1장의 결과를 이용하여 확인할 수 있
 다. 임의의 SBAS 위성의 방위각과 고각을 AZ 와 EL 이라고 하면, 1장
 의 식에서 α 와 β 를 치환하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos EL &= \cos \phi \cos \theta \\ \tan(AZ - \psi) &= - \frac{\sin \phi}{\cos \phi \sin \theta} \end{aligned}$$

ψ 를 변화시켜 가면서 위 두 식을 풀면 다음과 같이 $\phi(\psi)$ 와 $\theta(\psi)$ 를
 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \cos \theta(\psi) &= \frac{\sqrt{\cos^2 EL (1 + \tan^2(AZ - \psi))}}{\sqrt{1 + \cos^2 EL \tan^2(AZ - \psi)}} \\ \tan \phi(\psi) &= \frac{-\tan(AZ - \psi) \sqrt{1 - \cos^2 EL}}{\sqrt{1 + \cos^2 EL \tan^2(AZ - \psi)}} \end{aligned}$$

AZ 와 EL 으로 한정되어진 SBAS 위성에 대해 동체의 요각이 SBAS
 위성의 방위각 AZ 에 대하여 $AZ - \psi$ 만큼 차이가 나게 되면, 위 식에 의
 해 가시성이 확보되는 ϕ 와 θ 를 구할 수 있다.

3. MSAS 위성에 대한 시험

2025년 9월 30일 MSAS 137번 위성은 안양지역에서 방위각 180도, 고각
 47도에서 관측되었다. Figure 2의 rate table은 좌우 회전과 상하 회전이
 가능한 장비로서 치구를 설치하여 뒷 면에 안테나를 장착하였다.

시험은 2가지 방식으로 진행하였다. rate table의 좌우각을 137번 위성의
 방위각에 맞추고 상하각을 변화시켜가면서 가시성을 확인하였고, 다시
 rate table의 상하각을 137번 위성의 고각에 맞추고 좌우각을 변화시켜가
 면서 가시성을 확인하였다.

시험 결과는 2장에서 유도한 식의 결과와 동일하게 137번 위성의 방위각
 을 중심으로 ± 50 도에서 고각 40도일 때 위성 신호를 수신할 수 있었다.
 다만, 3축 회전장비를 적용할 수 없는 한계에 의해 비록 ϕ 가 영으로 고정
 된 시험이었으나, ϕ 가 가변인 경우는 2장의 해석 식에서 동등한 고각으로
 변환하여 결과를 확인할 수 있다.



Figure 2 자세변화에 의한 MSAS 위성 가시성 시험

III. 결론

본 논문에서는 동체가 회전운동을 하는 경우를 산정하여 GNSS 시스템
 안테나의 수평면이 회전한 결과가 한 쌍의 동경(β)과 고각(α)으로 대표
 할 수 있음을 유도하였다.

또한 정지궤도 위성에 대하여 ψ 를 변수로 하여 가시성이 확보되는 ϕ 와
 θ 를 해석적으로 구하였다. 구해진 해석 결과의 유효성을 확인하기 위하여
 2축 rate table을 이용하여 검증하였다.

SBAS 위성은 고정된 위치(GEO 궤도)를 유지하기 때문에, 특정 자세 상
 태에서 주어진 식에 의해 가시성을 미리 확인한다면, 안테나 배치 또는 임
 무 기획을 사전에 계획할 수 있을 것으로 판단된다.

GNSS 시스템이 SBAS 위성으로부터 안정적으로 위성신호를 수신하게
 된다면, 무기체계에 정밀한 위성 항법 정보를 연속적으로 제공할 수 있거
 나 무기체계의 운용성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 박범수, 안우근, 이장용, 고덕곤, "위성항법 배열안테나의 유도탄 동체
 후방 배치; GPS Array Antenna Installation on the Rear Missile
 Body", 2022, 한국항공학회논문지, vol.26 no.1, pp.9~14
- [2] Rogers, R. "Applied Mathematics in Integrated Navigation
 Systems, AIAA. Education Series.
- [3] Misra, P. Enge, P. "Global Positioning System: Signals,
 Measurements, and Performance", Ganga-Jamuna Press.
- [4] MPT-90 Pan and Tilt Positioner Product Manual, 3650 Woodhead
 Drive Northbrook, IL 60062