

저궤도 위성시스템과 지상시스템의 간섭 계산 기법

감혜미*, 오대섭**, 안도섭***

Calculation Scheme of Interference between Low Earth Orbit Satellite System and Terrestrial System

Hyemi Gam*, Dae-Sub Oh**, Do-Seob Ahn***

요 약

본 논문에서는 저궤도 위성망(LEO satellite network)과 지상망간의 간섭 영향을 분석하기 위해 사용되는 간섭 계산 요소 및 기법들을 정리하였다. 저궤도 위성의 궤도 및 위치정보를 시간에 따라 계산하는 요소들을 도출하고 두 시스템간의 실제 간섭량 계산에 적용되는 간섭 계산 기법을 서술하였다. 도출된 간섭 계산 기법은 저궤도 위성망과 지상망이 상호 간섭 영향 없이 운용될 수 있는 공유 조건을 설정하는데 활용될 수 있다.

Key Words : LEO satellite constellation, Orbit, Terrestrial System, Interference, calculation method

ABSTRACT

This paper addresses the calculation method of the interference produced between the LEO(Low Earth Orbit) satellite constellation and Terrestrial system operating in the same frequency and area. We describes the procedure used in the numerical computation of the statistics of the total interference produced by interference system. The presented results are applied for mutual protection of LEO satellite constellation and FS system during system design phase.

I. 서 론

위성을 활용한 통신시스템의 수요가 증가하고 시스템의 특성이 복잡해짐에 따라 타 무선망과의 체계적인 간섭 예측 기법을 구축하는 것이 요구되고 있다. 비정지궤도 위성망은 정지궤도 위성망보다 간섭 영향을 정량적으로 계산하는 것이 어렵지만 비정지궤도 위성을 이용한 무선 멀티미디어 서비스들의 활용도가 높아짐에 따라 간섭 분석 요구도가 증가하고 있다. ITU-R에서는 간섭 계산을 위한 다양한 알고리즘을 제공하고 있으며 각각의 간섭 시나리오에 따른 알고리즘을 도출하여 적용할 수 있다.

본문에서는 동일한 주파수를 사용하는 저궤도 위성망과 지상망의 간섭량을 계산하기 위한 간섭 계산 기법을 도출하여 정리하였다. 저궤도 위성망과 지상망은 상향/하향 링크에서 간섭경로를 구성하며 각각의 간섭 경로에 따라 계산 기법을 적용한 간섭량을 계산할 수 있다. 간섭계산 기법은 두 시스템이 상호 간섭 영향 없이 운용될 수 있는 효율적인 공유 조건을 설정하는데 사용될 수 있다. II장에서 저궤도 위성의 궤도 특성 및 위치정보를 시간에 따라 계산하는 요소들을 정리하고 III장에서 간섭량 계산의 기본이 되는 두 시스템간의 거리 및 off-axis 각 계산법을 서술하였으며 간섭 분석에 사용되는 계산 기법을 도

* 한국전자통신연구원 위성무선융합연구부(hyemig@etri.re.kr), ** (trap@etri.re.kr), ***(ahnds@etri.re.kr)

※본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 IT 핵심원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2008-F-013-02,

스펙트럼공학 및 밀리미터파대 전파자원 이용기술 개발]

논문번호 : 논0902-08, 접수일자 : 2009년 11월 20일, 최종게재논문통보일자 : 2009년 12월 28일

출하고, IV장 결론으로 마무리 지었다.

II. 간섭 계산 요소

저궤도 위성은 정지궤도 위성과 달리 관측지점을 기준으로 위성의 위치가 변하므로 타 무선망과의 간섭량을 계산하기 위해서는 시간에 따른 저궤도 위성의 정확한 위치 계산이 중요하다. 그림 1은 비정지궤도 위성의 궤도를 예측하는 궤도 변수를 나타내고 있다.

저궤도 위성의 위치에 대한 정확한 묘사를 위해서는 위성 궤도에 영향을 미치는 지구환경 요소를 모두 고려하여 계산해야 한다. 각 시간 스텝에서의 저궤도 위성의 위치와 속도를 계산 하기 위해서 케플러 궤도 요소가 고려되어야 한다.

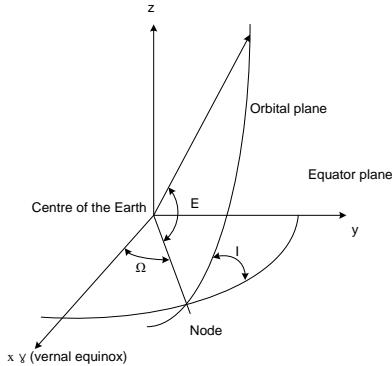


그림 1 저궤도 위성 궤도 변수

궤도 요소는 궤도면의 경사를 표시하는 궤도 경사각(l), 궤도의 크기를 표시하는 궤도 장반경(a), 궤도의 모양을 결정하는 이심률(e), 승교점에서 측정한 근지점 인수(w), 승교점의 적경(Ω), 타원상에서 위성의 위치를 표시하는 평균근점이각(M), 근지점 통과 시간 등의 변수로 구성된다, 식(1)은 궤도 요소를 이용하여 저궤도 위성의 위치정보를 계산하는 벡터 함수이다[1].

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos(\Omega) \cdot \cos(E) - \sin(\Omega) \cdot \cos(l) \cdot \sin(E) \\ \sin(\Omega) \cdot \cos(E) + \cos(\Omega) \cdot \cos(l) \cdot \sin(E) \\ \sin(l) \cdot \sin(E) \end{bmatrix} \quad (1)$$

궤도 경사각 l (rad)는 적도평면과 위성의 궤도평면 사이의 각도로 90° 보다 작은 경우 위성은 지구에서 바라볼 때 같은 방향을 가지고 동쪽으로 움직이고

90° 보다 큰 경우에는 서쪽 방향으로 움직인다. E 는 위도 인수인 근지점 인수(argument of perigee)와 진 근점이각(true anomaly)의 합으로 위성 초기 위도각(rad) E_0 와 위성 각속도(rad/s) ω 의 합으로 계산된다. 승교점의 적경 (RAAN- right ascension of ascending node) Ω 는 위성 궤도면과 적도면이 만나는 두 지점 중 남에서 북으로 교차하는 점의 적경으로 식(2)를 이용하여 계산되며

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega_r \quad (2)$$

여기서 Ω_0 는 위성 동작 시작점에서 승교점의 적경이며 Ω_r 은 위성 궤도면의 축이 지구의 자전축 주위를 회전하여 궤도면과 적도면의 교점이 이동하는 정도를 나타내는 위성 궤도 세차율 (rad/s)로 $\Omega_r = -\frac{3}{2}J_2 \cos(I)R_e^2 \frac{\sqrt{\mu}}{r^4}$ 로 계산된다. 식(1)과 식(2)를 이용하여 시간 변화에 따른 위성 궤도와 위치가 결정 된다.

그림 2는 저궤도 위성이 군으로 동작하는 모델을 보여준다 저궤도 위성은 낮은 고도 특성으로 인해 위성이 군으로 동작하여 통신링크를 형성한다. 위성 지구국의 3dB 빔폭 내에 존재하는 모든 저궤도 위성은 통신 링크가 형성되므로 타 무선망으로의 간섭 영향을 미칠 수 있다 저궤도 위성군에 의한 간섭 분석의 경우에는 각 저궤도 위성의 위치를 계산해서 간섭 알고리즘을 적용해야 한다.

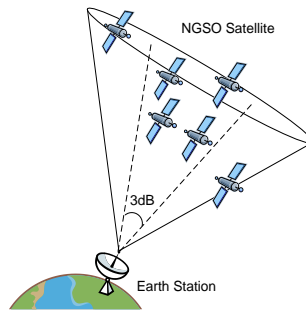


그림 2 저궤도 위성망 모델

III. 간섭 계산 기법

저궤도 위성망과 지상망의 간섭량을 계산할 때 원하는 간섭 시나리오를 작성하여 간섭 계산 기법을 적용한다. 설정하는 간섭 시나리오에 따라 각각의

간섭 경로에 따른 간섭량을 계산할 수 있다. III장에서는 간섭계산의 기본이 되는 간섭원과 피간섭 시스템간의 거리 및 off-axis 각의 계산법을 도출하고 간섭 계산 기법을 정리하였다.

1. off-axis 각 계산

두 시스템간의 간섭계산에서 시스템간의 거리는 계산 변수로 작용한다. 저궤도 위성의 경우 시간에 따라 위치가 변하는 특성이 있으므로 정확한 간섭량을 계산하기 위해서는 시간에 따른 위성과 지상 무선국간의 거리를 계산하는 것이 중요하다.

특히 시간에 따라 위치좌표가 변화하고 균으로 동작하는 저궤도 위성의 경우 모든 시간에 각각의 위성 좌표를 예측하여 거리를 계산하는데 시간적 손실이 있다. 따라서 다양한 거리 계산 알고리즘을 분석하여 비교적 간단하고 정확하게 거리를 계산하는 방법을 도출하는 것이 요구된다. 다음은 저궤도 위성과 지상 무선국의 위치를 이용하여 두 시스템의 거리를 계산하는 방법과 거리정보를 이용하여 양각을 도출하는 방법을 나타내고 있다.

그림 3은 저궤도 위성과 지상 무선국의 거리 및 양각을 계산하는데 사용되는 기하학적 모델을 보여 준다. 지표면과 지표면에서 위성을 바라보는 선이 이루는 각 ψ , 지구중심에서 위성에 이르는 거리 r_s , 지구중심에서 지구국에 이르는 거리 r_e 를 이용하여 지상무선국과 위성간의 거리 d 및 양각 El (elevation angle)을 계산한다. 식(3)은 저궤도 위성과 지상 무선국이 이루는 중심각(γ)을 계산하는 식이다[2].

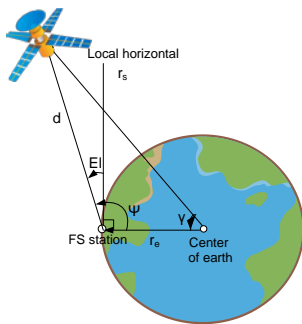


그림 3 저궤도 위성 거리, 양각 계산 모델

$$\begin{aligned} \cos(\gamma) &= \cos(L_e) \cos(L_s) \cos(l_s - l_e) \\ &+ \sin(L_e) \sin(L_s) \text{ (degree)} \end{aligned} \quad (3)$$

저궤도 위성과 지상 무선국, 지구중심이 이루는 삼각형을 기준으로 코사인 제 2법칙을 적용하여 저궤도 위성과 지상 무선국간의 거리를 식 (4)로 계산한다.

$$d = r_s \left[1 + \left(\frac{r_e}{r_s} \right)^2 - 2 \left(\frac{r_e}{r_s} \right) \cos(\gamma) \right]^{\frac{1}{2}} \text{ (km)} \quad (4)$$

식(5)는 저궤도 위성과 지상 무선국이 이루는 양각을 계산하는 식으로 저궤도 위성과 지상 무선국간의 간섭은 두 시스템이 이루는 양각의 영향을 받는다. 식(6), 식(7)은 방위각을 계산하는 식으로 양각과 같이 off-axis 각을 계산하는데 사용된다. 간섭량은 간섭원과 피간섭원간의 거리와 off-axis 각에 따라 달라진다

$$El = \cos^{-1} \left[\frac{r_s}{d} \sin(\gamma) \right] \text{ (degree)} \quad (5)$$

$$Az = 180^\circ - \alpha \text{ (degree)} \quad (6)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\tan |(l_s - l_e)|}{\sin(L_e)} \text{ (degree)} \quad (7)$$

식(8)은 저궤도 위성망과 지상 무선국과의 위치에 따른 off-axis 각 ϕ 를 계산하는 식이다. 두 시스템간의 간섭량을 계산할 때 수신 시스템의 안테나 이득은 간섭의 정도에 영향을 미치며 Off-axis 각은 수신 안테나 이득을 결정짓는 요소이다.

$$\phi = \cos^{-1}(\cos(El) \times \cos(Az)) \text{ (degree)} \quad (8)$$

off-axis 각은 일반적으로 안테나가 해당 위성을 바라보는 중심점에서 다른 위성을 향하는 지점 사이의 각으로 간섭량을 계산할 때 두 위성 사이의 off-axis 각은 지구의 중심에서 바라본 두 위성 사이의 각을(geocentric angle) 사용한다. 이 각은 지표면에서 바라본 두 위성 사이의 각(topocentric angle)과 그 값이 거의 같으나 더 작아 간섭 계산 결과가 더 엄격하게 나오며 계산 절차도 간단하다.

2. 간섭 계산

저궤도 위성망의 위치 분포가 결정 되면 안테나 패턴, 통신 링크의 출력 레벨 및 피간섭 시스템의 위치 등의 변수를 대입하여 총 간섭량을 계산한다.

그림 4는 저궤도 위성망과 지상 무선망간의 간섭 시나리오를 나타낸다. 두 시스템이 동일한 주파수를 공유한다고 가정하면 4가지 경로에 대한 간섭 시나리오가 구성된다. 그림은 저궤도 위성과 지구국이 하향링크를 형성하는 상황에서 저궤도 위성이 지상 무선국으로 간섭 영향을 미치는 간섭 경로와 지상 무선국이 지구국으로 간섭 영향을 미치는 간섭 경로를 나타내고 있다.

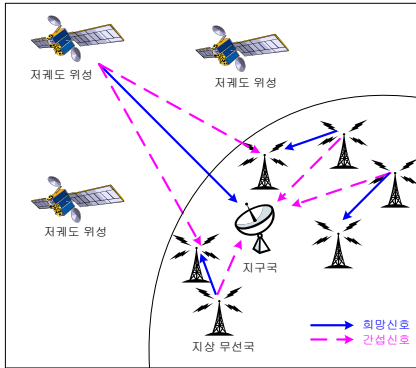


그림 4 저궤도 위성망과 지상 무선국간의 간섭 모델

저궤도 위성군에 의한 지상 무선국으로의 간섭량 (I)은 다음의 식(9)를 이용하여 계산 할 수 있다[3]. 저궤도 위성은 낮은 궤도 특성상 통신 영역을 커버하기 위해 위성이 균을 이루어 동작하며 간섭량을 계산하는 경우에는 전체 위성군에 의한 간섭영향을 고려해야 한다. 지상 무선국에 의한 지구국으로의 간섭 영향 분석의 경우에도 지구국으로 간섭영향을 미치는 전체 지상 무선국에 의한 간섭 영향을 고려해야 한다. 식(9)에서 m은 간섭영향을 미치는 저궤도 위성의 수, 또는 지상 무선국의 수로 총 간섭량은 각각 간섭원에 의한 간섭량을 합산하여 계산한다.

$$I_{total} = 10 \log \sum_{n=1}^m 10^{I_n/10} (dB) \quad (9)$$

식(10)은 간섭 신호 대 잡음신호의 비 (Interference-to-Noise Ratio: I/N)를 계산하는 식으로 설계 단계에서 시스템에 따라 타 무선망의 간섭으로부터 시스템을 보호하기 위한 기준 I/N값을 제시한다. 계산된 I/N가 기준 I/N보다 작으면 간섭이 발생하지 않으며 크거나 같으면 간섭이 발생하는 것으로 간주한다. 설정한 간섭 시나리오에 따라 간섭 계산 변수를 적용하여 I/N을 계산할 수 있다.

$$I/N = P_{sat/FS} + G_{sat/FS,t}(\theta) - L_{path} + G_{FS/sat,r}(\delta) - N(dB) \quad (10)$$

$\Delta T/T$ 는 수신 시스템의 잡음온도가 간섭으로 인해 얼마나 증가하는지를 평가하는 방법으로 신규 위성망이 사전공표 되었을 때 계산된 $\Delta T/T$ 가 기준값의 6%를 초과하는지 여부에 따라 위성망간의 상세 간섭 분석이 필요한 지를 판단한다. 다음은 저궤도 위성망에 의한 지상망으로의 간섭영향을 분석하기 위해 $\Delta T/T$ 를 계산하는 방법으로 저궤도 위성에 의한 최대 간섭과 지상무선국의 안테나 잡음 신호를 차례로 계산하여 간섭원에 의한 피간섭 시스템으로의 잡음온도 증가량을 계산한다. 이 결과가 기준을 초과하는 경우 C/I계산과 같은 세밀한 간섭 계산이 이루어져야 한다

$$I = PFD_{sat} + G_{sat,t} + 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) (dB(W/Hz)) \quad (11)$$

$$N_{FS} = 10 \log(kT_{sat}) (dB(W/Hz)) \quad (12)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = N_{FS} \times 10 \left(\frac{1-N_{FS}}{10} \right) \times 100(\%) \quad (13)$$

간섭 계산 변수들을 고려한 반송파 대 간섭전력비(Carrier-to-Interference Ratio: C/I)는 링크의 성능을 결정짓는 함수로서 상향/하향링크 각각 별도로 정의되며 위성망간의 간섭량을 평가할 때 보다 정확하게 수신시스템으로 유입되는 간섭량을 계산하는데 사용된다. 식(14)를 이용하여 계산된 C/I값은 전파규칙(Radio Regulation: RR)상에 명시된 최대 간섭 허용량과 비교하여 간섭 여부를 결정 할 수 있다[4].

$$C/I = [P_{FS/sat} + G_{FS/sat,t} + G_{FS/sat,r} - L_{path}] - [P_{sat/FS} + G_{sat/FS,t}(\theta) + G_{FS/sat,r}(\delta) - L_{path}] \quad (14)$$

식(10)~식(14)에서 P_{sat} 과 P_{FS} 는 저궤도 위성과 지상무선국의 송신전력(dBW/Hz)을 나타내며, $G_{sat}(\theta)$ 은 θ 방향으로 간섭 저궤도 위성의 송신 안테나 이득(dBi), $G_{FS,t}/G_{FS,r}(\delta)$ 는 지상무선국의 송신안테나 이득과 δ 방향으로의 수신 안테나 이득을 나타낸다. N은 지상무선국의 잡음온도(dB), L_{path} 는 두 시스템의 거리에 따른 자유공간손실, PFD_{sat} 은 위성의 전력속밀도, λ 는 파장, k는 볼츠만 상수, T_{sat} 은 저궤도 위성

망 하향링크 수신 시스템 잡음 온도를 나타낸다.

저궤도 위성 시스템으로부터 지상망을 보호하기 위해 저궤도 위성이 지표면으로 방사하는 전력속밀도(Power Flux Density: PFD)나 수평방향으로의 지구국 유효 등 방향 방사 전력(Effective Isotropic Radiation Power: EIRP)을 계산하여 간섭의 정도를 파악할 수 있다. 전파규칙에서는 동일 주파수 대역을 사용하는 통신망간에 발생하는 간섭영향으로부터 타 통신 시스템을 보호하기 인접 시스템 방향으로의 송신전력에 대한 제한 값을 제시하고 있다. 또한 두 시스템간의 간섭량은 피간섭 수신시스템에서 측정할 때 간섭원에 의해 발생하는 PFD의 합인 등 전력 속 밀도 (Equivalent power flux density: EPFD)로 계산 된다. 식 (15)는 EPFD 계산식으로 간섭량은 간섭원의 송신 안테나와 피간섭 시스템 수신 안테나의 off-axis 각에 따른 side lobe 특성에 의해 영향을 받는다.

$$EPFD = 10 \log_{10} \left(\sum_{n=1}^{n=m} 10^{P_n/10} \frac{G_t(\varphi_{1n}) G_r(\varphi_{2n})}{4\pi R_n^2 G_{rmax}} \right) \quad (15)$$

여기서, n은 간섭원 번호(1~Na)로 피간섭 시스템 수신 안테나에서 관측가능 한 간섭원의 수이며 P_n은 n번째 간섭원의 송신 RF 전력(dBW)이다. G_t(φ_{1n})/ G_r(φ_{2n})은 각각 간섭원의 피간섭 시스템 방향으로의 송신 안테나 이득(dB), 간섭원 송신 안테나 방향으로의 수신 안테나 이득(dB)을 나타낸다. G_{max}는 수신안테나 최대 이득(dB), φ₁와 φ₂는 간섭원의 boresight 방향과 피간섭 시스템 수신 안테나 사이의 off-axis 각, 피간섭 시스템 수신 안테나 boresight와 간섭원 송신 안테나 사이의 off-axis 각, R_n은 두 시스템 사이의 거리(m)를 나타낸다.

IV. 결 론

본문에서 저궤도 위성망과 지상망간의 효율적인 주파수 공유를 위한 간섭 계산 기법들을 제시하였다. 도출된 간섭 계산 기법은 간섭 영향 평가에 적용되어 두 시스템의 공유조건을 설정하는데 사용될 수 있다. 두 시스템간의 거리 및 양각을 일정 시간 간격으로 계산하는 방법 및 off-axis 각 계산법을 정리 하였으며 이는 간섭 계산의 기본이 되는 요소로 I, I/N, C/I, EPFD와 같은 간섭의 정도를 측정하는 값들을 계산할 때 사용된다. 또한 도출된 간섭 계산 기

법은 저궤도 위성이 군으로 동작하는 경우나 지상 무선국이 동시에 지구국으로 간섭 영향을 미치는 경우와 같이 다수의 간섭원이 존재하는 경우에도 적용 된다. 계산된 간섭량은 간섭 기준값과 비교하여 간섭 영향의 유무를 결정한다. 향후에는 간섭 계산 기법을 적용한 간섭 영향 분석 및 간섭을 완화하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Rec. ITU-R S.1325, "Simulation methodologies for determining statistics of short-term interference between co-frequency, codirectional non-geostationary-satellite orbit fixed-satellite service systems in circular orbits and other non-geostationary fixed-satellite service systems incircular orbits or geostationary-satellite orbit fixed-satellite service networks", ITU, 2003.
- [2] Timothy Pratt, Charles Bostian, Jeremy Allnutt, "Satellite Communications", Wiley, 2003
- [3] Jose Mauro P. Fortes and Jorge E. Amores Maldonado, "Protection of fixed service receivers from the onterfernece produced by non-geostationary satellites in a fixed satellite service network: a statistical interference analysis", International Journal of Satellite Communications, pp. 15-27, 2002.
- [4] ITU, "Handbook on satellite communications", 2002
- [5] Rec. ITU-R M.1184, "Technical characteristics of mobile satellite systems in the frequency bands below 3 GHz for use in developing criteria for sharing between the mobile-satellite service (MSS) and other services", ITU, 2003.

저 자

감 혜 미(Hyemi Gam)



2005년 2월: 한국항공대학교
전자공학과 졸업
2007년 2월: 한국항공대학교
전자공학과 석사
2008년 7월~현재: 한국전자
통신연구원 연구원

<관심분야> 위성통신, 무선통신

오 대 섭



1996년 2월: 경북대학교
전자공학과 졸업
1998년 2월: 경북대학교
전자공학과 석사
2000년 7월: LG정보통신
주임연구원
2000년 7월~현재: 한국전자
통신연구원 선임연구원

<관심분야> 위성통신, 전파통신, 디지털통신공학

안 도 섭(Doseob Ahn)



1988년 2월: 경북대학교
전자공학과 졸업
1990년 2월: 경북대학교
전자공학과 석사
1990년 2월~현재: 한국전자
통신연구원 위성휴대
전송 연구팀장

<관심분야> 위성통신, 성층권통신