

저궤도 군집 위성에서 따른 성층권 드론과의 RF와 FSO 성능 분석

유형선, 이상훈, 김종우, 이재열*, 김재현

아주대학교 전자공학과, *아주대학교 우주전자정보공학과

{hsyu, sanghoon1027, kimjw990, *jaeyel98, jkim}@ajou.ac.kr

An Analysis of the RF and FSO Performance Between Low Earth Orbit Satellites constellations and High-Altitude Platforms

Hyungsun Yu, Sanghoon Lee, Jongwoo Kim, Jaeyeol Lee, Jae-Hyun Kim

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

*Department of Space Electronics and Information Engineering, Ajou University

요약

저궤도 위성(LEO)과 성층권 드론(HAPS)을 이용하는 다계층 통신망이 주목받고 있다. 통신 사용량 증가로 지연율과 전송속도 등 성능향상이 필요함에 따라 FSO 이용이 필수적이다. 따라서, 본 논문은 저궤도 군집 위성에서 따른 성층권 드론과의 RF/FSO 통신 시스템 성능을 분석한다.

I. 서론

저궤도 위성(LEO, Low Earth Orbit satellite)과 성층권 드론(HAPS, High Altitude Platform Station)을 연계한 다계층 통신 시스템은 안정성과 범용성의 강점이 있는 RF(Radio Frequency) 방식을 이용한다. 하지만, 높은 사용량으로 인해 지연율과 전송속도 개선이 필요하며, 초고속 전송과 높은 보안성을 가지는 FSO(Free Space Optic) 이용이 필수적이다. 하지만, FSO는 거리가 멀어짐에 따라 손실값이 발생하는 단점이 존재한다. 이에 본 연구는 Walker Star, Walker Delta 궤도의 특징으로 인한 요소를 고려하여 RF 링크의 SINR(Signal to interference plus noise ratio)과 FSO 링크의 SNR(Signal to noise ratio)을 분석하여 다양한 군집위성궤도에서 두 링크의 성능 변화를 평가한다.

II. 시스템 모델

그림 1의 (a)는 제안하고자 하는 RF/FSO 시스템 모델이다. 위성은 $J = \{j \mid j = 1, 2, \dots, J\}$ 개로 구성한다. 성층권 드론은 고도 α km에서 반지름 β km의 원형 궤도 비행을 가정하고, $I = \{i \mid i = 1, 2, \dots, I\}$ 로 구성한다. 저궤도 위성에서 성층권 드론으로의 RF/FSO 다운링크 상황을 가정하였다.

그림 1의 (b), (c)는 각각 Walker Star와 Walker Delta 궤도 배치 방식을 나타낸다. Walker Star는 극지방까지 서비스가 가능한 극궤도 기반의 배치 방식이고, Walker Delta는 적도면을 일정한 간격으로 나눠서 궤도가 배치되며, 궤도 경사각이 Walker star보다 작아 중저위도 지역에 통신 서비스 제공이 용이하다. 성층권 드론과 저궤도 위성 간 거리와 각도는 지구 중심을 원점으로 하는 Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) 좌표계에서 계산하였다. RF 링크의 채널 모델은 3rd Generation Partnership Project (3GPP) 표준 문서를 기반으로 하였다 [1].

FSO의 순간 SNR γ_{SH_j} 은 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_{SH_j} = \zeta P_S G_r I_{SH_j}^2 / N_0, \quad (1)$$

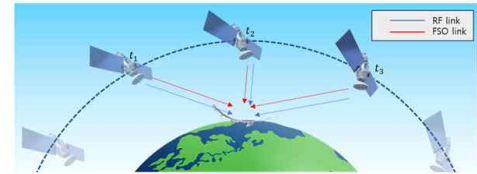


그림 (a) System model



그림 (b) Walker delta



그림 (c) Walker star

그림 1 제안하는 HAPS-LEO 시스템 모델

ζ 는 광전 변환 계수, P_S 는 위성 송신 전력, n_H 는 가우시안 잡음, N_0 는 잡음 전력, G_r 는 수신 안테나 이득, I_{SH_j} 는 LEO와 HAPS 간의 복사조도이다 [2]. I_{SH_j} 는 다음과 같이 계산된다.

$$I_{SH_j} = I_{SH_j}^p I_{SH_j}^a I_{SH_j}^r, \quad (2)$$

$I_{SH_j}^p$ 는 포인팅 오차, $I_{SH_j}^a$ 는 성층권 감쇠, $I_{SH_j}^r$ 는 레일리 산란을 의미한다. $I^{p_{SH_j}}$ 의 확률밀도 함수는 다음과 같이 정의한다 [2].

$$f_{I_{SH_j}^p}(I^p) = \frac{g^2 \exp(-\frac{s^2}{2\sigma_s^2})}{A_0^g} (I^p)^{g^2-1} I_0 \left(\frac{s}{\sigma_s^2} \sqrt{\frac{-w_{eq}^2 \ln I_{A_0}^p}{2}} \right), \quad (3)$$

$g = w_{eq}/2\sigma_s$ 는 등가빔 반경과 지터 표준편차의 비율, A_0 는 성층권 드론의 최대 수신 전력, s 는 위성의 방사각을 의

표 1. 위성 파라미터

위성 종류	Walker star	Walker delta
궤도면 수	6	28
궤도 당 위성 수	11	120
총 위성수	66기	3,360기
궤도경사각	86.4°	43°
반장경	6,971 km	6,901 km
이심률	0	0.0001
고도	550 km	

표 2. FSO 링크 파라미터

Symbol	Value	Symbol	Value
λ	1550 nm	N_0	-117.26
P_S	100 dBm	ζ	0.64
α	20 km	θ_T	15 μ rad
β	5 km	R	80 mm
ψ	$10^{-4} km^{-1}$	G_r	104.2 dB

미한다. $y = \sqrt{\frac{\pi}{R}} / (L_{SH_j} \times \Theta_T)$ 로 계산되며, R 은 안테나의 직경을 의미한다.

성층권 감쇠 $I_{SH_j}^a$ 는 대기 조건에 따른 신호 약화를 의미하며, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{SH_j}^a = \exp(-\Psi_{SH_j} L_{SH_j}), \quad (4)$$

L_{SH_j} 은 성층권 이동 경로 길이, Ψ_{SH_j} 는 성층권 감쇠 계수를 의미한다 [2].

$I_{SH_j}^r$ 는 레일리 산란 투과율로 다음과 같이 계산된다 [3].

$$I_{SH_j}^r = \exp(-\tau), \quad (5)$$

τ 는 레일리 산란의 광학적 두께로, 아래와 같이 β 를 경로에 대하여 적분하여 계산한다 [3].

$$\tau(\lambda, z, 0, \theta) = \int \beta(\lambda, z(s)) ds, \quad (6)$$

λ 는 위성 송신 FSO 파장을 의미한다. $\beta = \sigma \times n$ 으로 계산되며 $\sigma(\lambda)$ 는 단일 분자 산란 단면적, n 은 표준대기상태에서의 온도와 압력을 통해 계산된 분자 밀도를 의미한다 [3].

III. 시뮬레이션 결과

성능평가는 MATLAB으로 진행한다. 위성 파라미터는 표 1에 기재되어 있으며, 표 2에는 FSO 링크파라미터를 나타낸다.

그림 2는 Walker delta에서의 RF/FSO의 신호값이다. 위성수가 많아져 간섭이 증가하는 상황에 RF는 20~30 dB의 안정적인 성능을 나타내는 것을 볼 수 있고, FSO의 SNR는 좁은 범폭으로 간섭에 영향을 적게받아 100 dB 이상으로 좋은 성능을 유지하는 것을 확인할 수 있다. Walker delta에서 궤도면 당 위성의 수가 많아 위성 중 신호값이 가장 좋은 위성을 선택하여 신호 값을 계산하는데 이는 FSO의 장점을 활용한 것이다. 그림 3은 Walker star에서 RF/FSO의 신호이다. RF는 walker star의 적은 위성 수로 간섭이 적지만 거리도 함께 커져 감쇠

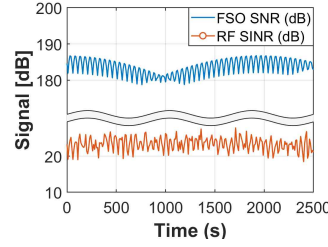


그림 2 Walker delta에서의 RF/FSO 성능

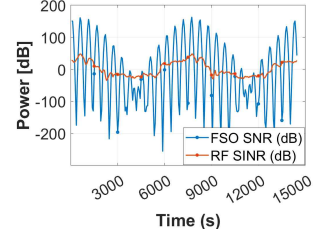


그림 3 Walker star에서의 RF/FSO 성능

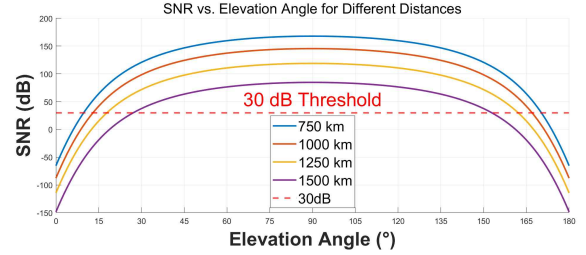


그림 4 RF/FSO 성능거리와 상승각에 따른 SNR

되어 delta와 유사하게 20~30 dB의 안정적인 값을 유지하였다. 하지만 FSO는 적은 위성수와 거리에 따른 감쇠에 따라 신호값의 변동이 큰 것을 볼 수 있다.

그림 4는 RF/FSO의 거리와 상승각에 따른 SNR을 나타낸다. 위성궤도에 관계없이 거리에 따른 감쇠가 가장 큰 위성을 기준으로 대략 30°~150°까지는 RF보다 높은 성능을 보이는 것을 알 수 있으며 Walker star에서도 조건에 따라 RF보다 우수한 성능을 낸다.

VI. 결론

본 연구는 저궤도 군집 위성에 따른 RF와 FSO의 SINR과 SNR 값을 각각 비교, 분석하였다.

시뮬레이션 분석 결과, Walker Delta에서는 FSO가 높은 안정성과 SNR을 유지할 수 있기에 고품질 통신 환경을 제공할 수 있으며, 반면, Walker Star에서는 위성 수가 적어 FSO의 성능이 불안정했으며, RF가 더욱 안정적인 통신 품질을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 향후, 궤도 변화에 따른 포인팅 제어의 최적화, 성층권 대기 데이터 기반, 상승각에 따른 신호값의 변화를 고려해 동적 채널 전환 운용 전략에 관한 연구를 진행할 예정이다.

참고 문헌

- [1] 3GPP TR 38.811 v15.4.0, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)," Sep. 2019.
- [2] O. Ben Yahia, E. Erdogan, G. K. Kurt, I. Altunbas, and H. Yanikomeroglu, "HAPS selection for hybrid RF/FSO satellite networks," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 4, pp. 2855-2868, Aug. 2022.
- [3] A. Bucholtz, "Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere," *Applied Optics*, vol. 34, no. 15, pp. 2765-2773, May 1995.