Beampattern analysis of Cooperative Beamforming with Doppler in LEO Satellite-Aided UAV Swarm Networks

서정곤, 정해준
경희대학교

{sjgon, haejoonjung}@khu.ac.kr

LEO 위성 지원 UAV 네트워크에서 도플러와 협력 빔 포밍의 빔 패턴 분석

Jung Gon Seo, Hae Joon Jung
Kyunghee Univ.

요 약

본 논문은 저궤도위성을 포함한 비지상 네트워크에서 고속 위성운동에 의해 발생되는 도플러 변이의 중요성을 언급하고, 저궤도 위성과 무인항공기 군집 간의 통신에서 발생되는 도플러 변이로 인한 반송파 주파수 오프셋이 협력 빔포밍에 미치는 영향에 대해 분석하고 최적의 군집의 크기를 보여준다. 분석의 결과는 시뮬레이션을 통해 보여준다.

Ⅰ. 서 론

위성, 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV) 등의 항공 플랫폼, 지상 네트워크를 통합하는 우주-항공-지상 통합 네트워크(space-air-ground integrated network, SAGIN)는 넓은 커버리지와 편재성, 지속적인 서비스 가용성 및 확장성을 달성하기 위한 6 세대(6G) 이동통신의 핵심 요소로 알려져 있다[1]. 위성은 지상 인프라에 대한 의존도를 최소화하면서 전 세계를 커버하고 중단 없는 서비스를 제공할 수 있습니다. 또한 지상국 및 위성국과 연결된 UAV 는 완전히 통합된 6G 이기종 네트워크를 위한 SAGIN 을 구축할 수 있다[2].

UAV 군집처럼 공간적으로 분산된 노드가 함께 전송 위상을 조정하여 원하는 수신기에서 결합된 신호의 출력을 극대화하는 협력 빔포밍(cooperative beamforming, CB)은 신호 수신을 향상하고 간섭을 완화하며 전반적인 시스템 효율성을 개선할 수 있는 흥미로운 방법을 제시한다. 특히, CB 는 본질적으로 전력과 하드웨어의 한계가 있는 UAV 와 도심 항공 모빌리티(urban air mobility, UAM)와 같은 비지상 네트워크(non-terrestrial networks, NTNs) 노드에 높은 신뢰성, 낮은 지연 시간, 확장된 전송 범위를 효과적으로 제공할 수 있다[3]. 그러나 6G 서비스에서 NTN 노드의 높은 이동성은 CB 를 수행하는 각 노드가 수신기에 대해 서로 다른 움직임을 가지기 때문에 수신 신호에서 서로 다른 도플러 변이를 유도하는 반송파 주파수 오프셋(carrier frequency offset, CFO)으로 인해 어려움을 겪을 수 있습니다 [4].

본 논문에서는 지구 저궤도(low-earth orbit, LEO) 위성과 UAV 군집 네트워크에서 군집의 크기에 따라 도플러 변이로 인한 UAV CB 에서 빔 패턴(beampattern, BP)의 변화를 분석하고 최적의 군집의 크기를 보여준다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 분석

이번 장에서는 LEO 위성과 UAV 군집네트워크에서 발생하는 도플러 변이를 정의하고, 도플러로 인한 UAV CB 에서 BP 의 변화를 분석한다. UAV 는 반지름 R 의 구형 군집에 무작위로 배치되며, 중심은 고도 h_U 에 위치한다. 구형 좌표를 사용하여 $P=(r,\phi,\theta)$ 에 위치한 일반적인 노드(즉, UAV)를 가정한다. 구형 체적 내에서 3D 균일 분포를 가정할 때, 확률 밀도 함수는 $f_{r_n,\phi_n,\theta_n}(r,\phi,\theta)=\frac{3r^2}{4\pi R^3}\sin\theta$이고, $0\le r\le R,\ 0\le\phi<2\pi,\ 0\le\theta\le\pi$이다.

Ⅱ-1. Carrier Frequency Offset caused by Doppler

이번 섹션에서, 몇 가지 가정을 통해 UAV 군집중심과 LEO 위성 사이에 도플러 변이를 정의한다. 나아가, 각각의 UAV 노드에서 발생하는 도플러 변이에 예측가능한 UAV 군집 중심의 도플러 변이만큼 보상하여, n번째 UAV 노드에서의 CFO 를 정의한다. LEO 위성으로부터 UAV 군집 중심의 도플러 변이에 대해 다음과 같은 분석적 근사치를 사용한다. ω_F는 지구 중심 고정(Earth centered fixed, ECF) 프레임에서 위성 각속도이며, LEO 위성의 경우 [5]의 방식에 따라 $\omega_F\approx\omega_S+\omega_E\cos[i]$로 근사할 수 있다. 여기서 ω_S 와 ω_E 는 각각 지구 중심 관성(Earth centered inertial, ECI) 프레임에서 위성과 지구의 각속도를 나타내며, i 는 적도면에 상대적인 위성의 궤도 경사(radians)를 나타낸다. $\alpha(t)\in[0,\frac{\pi}{2}]$ 는 UAV 군집 중심에서 시간 t 에서의 LEO 위성 고도각의 정의이며, 도플러 변이 공식의 복잡성을 완화하기 위해 $t=t_{max}=0$에서 관찰되는 최대 위성고도각 $\alpha(t_{max})=\frac{\pi}{2}$로 가정한다. 앞선 가정을 기반으로 위성운동에 의한 도플러 변이 $X(t)$는 [5]에 의거하여 다음과 같다.

$$X(t)=-\frac{f_c}{c}r_U\omega_F\cos[\alpha(t)], \tag{1}$$

여기서 f_c 는 반송파 주파수이고, $r_U=r_E+h_U$, r_E 는 지구 반지름, c는 빛의 속도이다. 이때 위성고도각 $\alpha(t)$는 아래 식과 같이 표현된다.

$$\cos[\alpha(t)]=\left(\frac{r_O\sin[\gamma(t)]}{D_t}\right), \tag{2}$$

이때, $r_O=r_E+h_O$는 위성궤도의 반지름이고, h_O는 위성의 고도, $\gamma(t)=(t-t_{max})\omega_F$는 시간 t에서 위성하위지점과 UAV 군집 중심 각도이며, [6]에 의거한 $D(t)$는 다음과 같다.

$$D(t)=\sqrt{r_U^2+r_O^2-2r_Or_U\cos[(t-t_{max})\omega_F]}. \tag{3}$$

n번째 UAV 노드에서 위성까지의 거리가 $D_n(t)$일때, n번째 노드에서의 도플러 $X_n(t)=-\frac{f_c}{c}\dot{D}_n(t)$ 이고, 시간 t 에서의 도플러 변이에 의한 CFO 는 다음과 같다.

$$\Delta f_n(t)=X_n(t)-X(t). \tag{4}$$

Ⅱ-2. Beamforming with Doppler CFO

이번 섹션에서, 도플러 변이로 인한 CFO 가 있을 때 UAV CB 를 분석한다. 논문 [7]에 의거하여, 관찰기간을 T_{od} 로 할 때, 시간 t 에서 CFO 에의한 n 번째 UAV 의 phase offset 은 다음과 같다.

$$\rho_n(t) = 2\pi\Delta f_n(t)T_{od} \quad (5)$$

그러므로, 수신자의 위치 $(D(t), \phi, \theta)$ 에서 array factor 는 다음과 같다.

$$F(t, D, \phi, \theta) = \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(D(t)-D_0(t))} \sum_{n=1}^{N} e^{-j\alpha_n} e^{-j\beta_n} e^{j\rho_n(t)} \quad (6)$$

여기서 λ 는 파장이고. α_n 과 β_n 은 [7]에 따라 (ϕ, θ) 와 (ϕ_n, θ_n)에 의한 위치관계이다. 따라서, CFO 가 있는 경우의 빔 패턴은 다음과 같다.

$$BP(t, \phi, \theta) = |F(t, \phi, \theta)|^2 =$$

$$\frac{1}{N} + \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^{N} e^{-j\alpha_n} e^{-j\beta_n} e^{j\rho_n(t)} \sum_{\substack{m=1 \\ m\neq n}}^{N} e^{-j\alpha_m} e^{-j\beta_m} e^{j\rho_m(t)} \quad (7)$$

Ⅱ-3. 시뮬레이션 결과

이번 섹션에서는 수식(7)을 사용하여 시뮬레이션 결과를 보여준다. UAV 노드수 N은 3 차원 Poisson point process (PPP)를 따르며 PPP 의 밀도는 1×10^{-11}이고, $f_c = 2\text{GHz}$, $r_E = 6371\text{km}$, $\omega_E = 7.27 \times 10^{-5}\text{rad/sec}$, $\omega_s = 0.0011\text{rad/sec}$, $h_O = 600\text{km}$, $h_U = 20\text{km}$, $T_{od} = 1\text{ms}$로 설정한다.

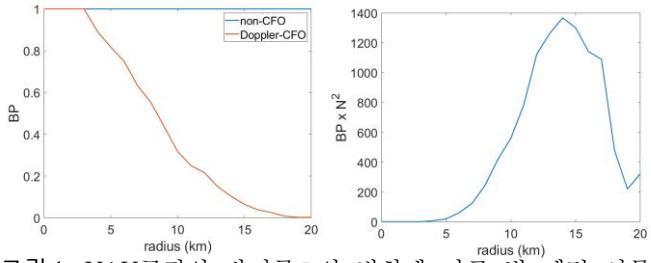

그림 1. UAV군집의 반지름 R의 변화에 따른 빔 패턴 시뮬레이션 그래프

그림 1 은 $t = 100\text{sec}$ 일때, 위성의 위치에서 관측되는 빔 패턴이다. 그림 1(좌)는 반지름 R 의 변화에 따른 도플러 CFO 가 없을 경우와 있을 경우에 빔 패턴을 보여준다. 반지름 R이 증가하면서 도플러 CFO 의 분산이 증가함에 따라 BP 값이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 1(우)는 도플러 CFO 가 있을 경우에서, BP× N^2 의 결과를 보여준다. 반지름 R 의 증가에 따라 노드의 수가 증가하지만 BP× N^2의 최댓값은 $R = 14\text{km}$ 의 경우에 나타난다. 이를 통해 도플러의 영향으로 인한 최적의 UAV 군집의 크기, 노드 수가 있음을 보여준다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 6G 이동통신에 적합한 LEO 위성과 UAV 군집 네트워크에서 발생하는 도플러 CFO 로 인한 빔패턴을 분석했습니다. 시뮬레이션 결과를 제시하여 CFO 의 영향을 정량화하고, 시뮬레이션을 통해 CFO 로 인한 빔 포밍에 상당한 손실 및 최적의 UAV 군집의 크기, 노드의 수가 존재함을 관찰되었으며, 이는 도플러 보상의 중요성을 강조한다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the MSIT, Korea, in part under the National Research Foundation of Korea grants (RS-2023-00303757, NRF-2022R1F1A1065367 and NRF-2022R1A4A3033401) and in part under the Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grants (RS-2024-00397480, IITP-2024-2021-0-02046, IITP-2023-RS-2023-00266615).

참 고 문 헌

[1] G. Araniti, A. Iera, S. Pizzi, and F. Rinaldi, “Toward 6G non-terrestrial networks,” IEEE Netw., vol. 36, no. 1, pp. 113-120, Feb. 2022.

[2] M. Ghamari, P. Rangel, M. Mehrubeoglu, G. S. Tewolde, and R. S. Sherratt, “Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: A review,” IEEE Access, vol. 10, pp. 102492-102531, Sep. 2022.

[3] G. Jang, B. You, I. -H. Lee, H. Jung and H. Shin, "Secrecy Rate Degradation of Ground-to-Air Collaborative Beamforming Due to UAV Jitter," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 9, pp. 12361-12366, Set. 2023

[4] Ainur Daurembekova, Hans D. Schotten, Opportunities and limitations of space-air-ground integrated network in 6G systems, in: 2023 IEEE PIMRC, 2023, pp. 1-7.

[5] I. Ali, N. Al-Dhahir, and J. E. Hershey, “Doppler characterization for LEO satellites,” IEEE Trans. Commun., vol. 46, no. 3, pp. 309-313, 1998.

[6] J. -G. Seo, I. -H. Lee, H. Jung, D. B. da Costa and H. Shin, "Doppler Characterization in LEO Satellite-Aided UAV Swarm Networks," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 13, no. 4, pp. 1178-1182, Apr. 2024.

[7] Yeonwoong Kim, In-Ho Lee, Sunghwan Cho, Haejoon Jung, “Beampattern analysis of cooperative beamforming with carrier frequency offsets in three-dimensional wireless networks,” ICT Exp., Feb. 2024.