

확률 기하학을 이용한 LEO 위성 네트워크의 도플러 특성 분석

서정곤*, 김연웅, 정해준

*인천대학교, 경희대학교, 경희대학교

wnrlqnsek@inu.ac.kr, rladusdnd135@khu.ac.kr, haejoonjung@khu.ac.kr

Analysis of Doppler Characteristics of LEO Satellite Network Using Stochastic Geometry

Seo Jung Gon, Kim Yeon Woong, Jung Hae Joon

Incheon Univ., Kyunghee Univ., Kyunghee Univ.

요약

본 논문은 지구 저궤도위성으로 구성된 비지상 네트워크에서 고속 위성운동에 의해 발생하는 도플러 주파수 변이의 통계적 특성화를 분석한다. 일부 가정을 단순화하여, 누적 분포 함수와 확률 밀도 함수로 클러스터 내에 랜덤하게 존재하는 사용자의 도플러 변이 크기를 도출한다. 확률 밀도 함수를 통해 주요 시스템 매개 변수 간의 상호 작용을 조사한다. 분석의 정확성은 시뮬레이션과의 비교를 통해 검증한다.

I. 서론

지구 저궤도(Low-Earth Orbit, LEO) 위성 통신 서비스는 기존의 기상 기지국이 커버할 수 없거나 배치할 수 없는 영역에 연결성을 제공한다. 저궤도 위성 통신은 낮은 지연시간과 높은 서비스 밀도 때문에 beyond 5G (B5G)와 6G 에서 적합하다[1]. 하지만, 저궤도 위성 통신은 위성의 고속 움직임으로 인해 높은 도플러 변이(Doppler shift)가 발생한다. 단말기에 대한 위성의 상대 속도로 인해 지구상의 모바일 사용자 또는 기지국에서 겪는 도플러 주파수 변이는 수신 신호의 왜곡으로 이어진다. 이를 위한 물리계층의 관심사는 높은 도플러 주파수 변이에 대처하는 것이다. 따라서, 저궤도 위성 통신 시스템의 설계를 위한 도플러 변이 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다 [2]. 이러한 맥락에서, 본 논문에서는 확률 기하학(stochastic geometry)을 활용하여 저궤도 위성 고정 사용자에게 통신 서비스를 제공하는 비지상 네트워크(non-terrestrial network, NTN)에서 도플러 변이의 통계적 특성을 분석한다. 지표면에 균일하게 존재하는 클러스터 내의 임의의 사용자에게 대한 도플러 변이의 누적분포 함수(cumulative distributions function, CDF)와 확률밀도 함수(probability density function, PDF)를 도출한다. 또한 주요 시스템 매개 변수인 클러스터의 크기, 위성 위치의 변화와 도플러 변이의 상호 작용을 보여주고, 제시된 결과를 시뮬레이션과 비교하여 분석의 정확성을 검증한다.

II. 시스템 모델 및 분석

본 논문에서는 지구 표면에 사용자 장비(User equipments, UEs)들이 고정된 위치에 있고, 저궤도 위성이 공전하며 각 클러스터 내의 사용자들이 동시 스케줄링되는 위성 통신 시스템을 가정한다. 평면이 아닌 3 차원 기반의 분석 방식의 복잡성을 완화하기 위해 지구 표면에서 spot beam 에 의해 형성된 평면위에 원형 셀을 근사화 한다. 현실적인 사용자 분포를 모델링하기 위한 Matern cluster process(MCP)의 적합성은 [3]에 통해 입증된다. 다음으로는 UEs 에서 관찰되는 도플러 변이 특성을 파악하기 위한 분석을 진행한다.

II-1. 도플러 변이 공식

이번 섹션에서, 지구 표면에 위치한 정지된 UE 에서 도플러 변이에 대해 다음과 같은 분석적 근사치를 사용한다. ω_F 는 Earth centered fixed (ECF) 프레임에서 위성 각속도이며, LEO 위성의 경우 [4]의 방식에 따라 $\omega_F \approx \omega_S + \omega_E \cos(I)$ 로 근사할 수 있다. 여기서 ω_S 와 ω_E 는 각각 Earth centered inertial (ECI) 프레임에서 위성과 지구의 각속도를 나타내며, I 는 적도면에 상대적인 위성의 궤도 경사를 나타낸다. $\gamma_t \in [0, \frac{\pi}{2}]$ 는 지구 표면의 정지된 UE 에서 시간 t 에 대한 LEO 위성까지의 고도(elevation angle)로 정의한다. $t = t_{max}$ 에서 최대 고도 γ_{max} 가 관찰된다. 위성운동에 의한 도플러변이 D_t 는 [5]에 기반하여 다음과 같다.

$$D_t = -\frac{f_c r_E \dot{\psi}_t \cos(\gamma_t)}{c}, \quad (1)$$

여기서 f_c 는 carrier 주파수이고, r_E 는 지구 반지름, c 는 빛의 속도이다. 이때 하위 위성 지점과 UE 사이의 중심 각도 변화율 $\dot{\psi}_t$ 는 아래 식과 같이 표현된다.

$$\dot{\psi}_t = \frac{\omega_F \Phi(\gamma_{max}) \sin((t-t_{max})\omega_F)}{\sqrt{1-\Phi^2(\gamma_{max}) \cos^2((t-t_{max})\omega_F)}}, \quad (2)$$

이 때, $r_0 = r_E + h$ 는 위성궤도의 반지름이고, $\Phi(\gamma_{max})$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$\Phi(\gamma_{max}) = \cos(\cos^{-1}(\frac{r_E}{r_0} \cos(\gamma_{max})) - \gamma_{max}), \quad (3)$$

이에 따라서 도플러 변이는 다음과 같이 주어진다.

$$D_t = -\frac{f_c r_E r_0 \omega_F \sin((t-t_{max})\omega_F) \Phi(\gamma_{max})}{c s_t}, \quad (4)$$

$\Phi(\gamma_{max})$ 는 (3)에 의해 정의되고, [4]에 의거한 s_t 는 다음과 같다.

$$s_t = \sqrt{r_E^2 + r_0^2 - 2r_0 r_E \cos((t-t_{max})\omega_F) \Phi(\gamma_{max})}, \quad (5)$$

[2]의 공식에 따라, ψ_t 와 $\Phi(\gamma_{max})$, γ_t 와 ψ_t 는 아래와 같은 관계를 가진다.

$$\sin(\psi_t) \dot{\psi}_t = \omega_F \Phi(\gamma_{max}) \sin((t-t_{max})\omega_F), \quad (6)$$

$$\cos(\gamma_t) = \frac{r_0 \sin(\psi_t)}{s_t}. \quad (7)$$

(1)에 (2)~(7)을 종합하여, UE 를 $\gamma_{max} = \frac{\pi}{2}$, $\psi_t = \omega_F$ 인 위치에 있다고 가정하면 도플러 변이 공식은 다음과 같이 간략화 된다.

$$D_t = -\frac{f_c r_E \omega_F \cos(\gamma_t)}{c}. \quad (8)$$

II-2. MCP 도플러 특성화

이번 섹션에서, MCP 에 대한 도플러 변이 특성의 분석을 제공합니다. R 는 클러스터의 반지름이고, ρ 는 클러스터의 중심으로부터 하위 위성 지점사이의 거리이고, r 은 임의의 사용자로부터 하위 위성 지점사이의 거리이다. 위성 하위 지점과 임의의 사용자가 이루는 각도 $\hat{\theta}$ 와 클러스터의 중심과 임의의 사용자가 이루는 각도 $\hat{\phi}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{\theta} = \cos^{-1} \left[\frac{r^2 + \rho^2 - R^2}{2\rho r} \right] \quad (9)$$

$$\hat{\phi} = \cos^{-1} \left[\frac{R^2 + \rho^2 - r^2}{2\rho R} \right]. \quad (10)$$

(9), (10)은 [5, Theorem 2.3.6]에 의해 증명된다.

r 의 분포에 따른 CDF 는 [2]에 의거하여 다음과 같다.

$$F_M(r, R|\rho) = \begin{cases} \frac{r^2}{R^2}, & 0 \leq r \leq R - \rho \\ \frac{r^2}{\pi R^2} \left(\hat{\theta} - \frac{1}{2} \sin(2\hat{\theta}) \right) + \frac{1}{\pi} \left(\hat{\phi} - \frac{1}{2} \sin(2\hat{\phi}) \right), & |R - \rho| < r \leq R + \rho, \end{cases} \quad (11)$$

또한, r 의 분포에 따른 PDF 는 다음과 같다.

$$f_M(r, R|\rho) = \begin{cases} \frac{2r}{2R^2}, & 0 \leq r \leq R - \rho \\ \frac{2r \cos^{-1} \left[\frac{r^2 + \rho^2 - R^2}{2\rho r} \right]}{\pi R^2}, & |R - \rho| < r \leq R + \rho. \end{cases} \quad (12)$$

클러스터 중심에 상대적인고도 h 와 기울기범위 s_t 에 있는 위성의 경우, 균일한 UE 분포를 가진 반지름 λ 의 클러스터 내 도플러 변이 크기의 CDF $F_{d,M}^t(d) = \Pr[|D_t| \leq d]$ 는 다음과 같다.

$$F_{d,M}^t(d) = F_M \left(\frac{hd}{\sqrt{X^2 - d^2}}, \lambda | \rho_t \right), \quad (13)$$

여기서 $F_M(\cdot; \cdot)$ 는 (11)을 따르고, $X = \frac{f_c r_E (\omega_s + \omega_E \cos(I))}{c}$, $\rho_t = \sqrt{s_t^2 - h^2}$ 이다. PDF 는 (12), (13)을 통해 다음과 같이 구해진다.

$$f_{d,M}^t(d) = \frac{hX^2}{(X^2 - d^2)^{3/2}} f_M \left(\frac{hd}{\sqrt{X^2 - d^2}}, \lambda | \rho_t \right), \quad (14)$$

III. 수치적 결과 및 결론

이번 장에서는 클러스터 내의 균일한 UE 분포를 가진 사용자에서 도플러 변이 크기의 PDF 에 대한 다양한 시스템 매개 변수의 영향을 조사한다. PDF 에 대한 그림은 식 (12), (14)를 사용한다. $f_c = 2\text{GHz}$, $r_E = 6371\text{km}$, $\omega_E = 7.27 \times 10^{-5}\text{rad/sec}$, $\omega_s = 0.0011\text{rad/sec}$ 로 설정한다. 그림 1 은 $h = 600\text{km}$, $\rho_t = 2\lambda$ 에서, 클러스터의 반지름 λ 의 변화에 따른 도플러 변이 크기의 PDF 변화를 보여준다. λ 가 증가할수록 도플러 변이 크기가 증가하고, 분석된 결과와 시뮬레이션의 차이가 증가한다. 그림 2 은 $h = 600\text{km}$, $\lambda = 100\text{km}$ 에서, ρ_t 의 변화에 따른 도플러 변이 크기의 PDF 변화를 보여준다. 하위 위성 지점이 클러스터 중심으로부터 멀어질수록 도플러 변이 크기가 증가한다.

본 논문에서는 6G 이동통신에서 사용 가능한 LEO 위성 통신 서비스에서 발생하는 도플러 주파수 변이에 대한 분석을 진행한다. LEO 위성의 빠른 상대 속도 때문에 지구 표면에 위치한 UEs 는 높은 주파수 변이를 겪는다. 일부 가정과 확률 기하학을 이용하여 UEs 가 겪게 되는 도플러 주파수 변이에 대해 분석하였다.

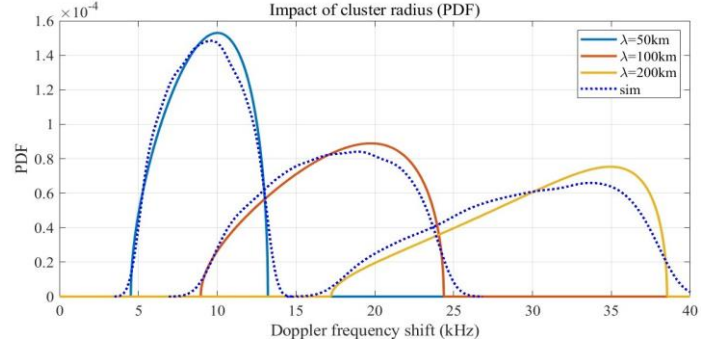


그림 1. 클러스터 반지름(λ)의 변화에 따른 도플러 변이 크기의 PDF.

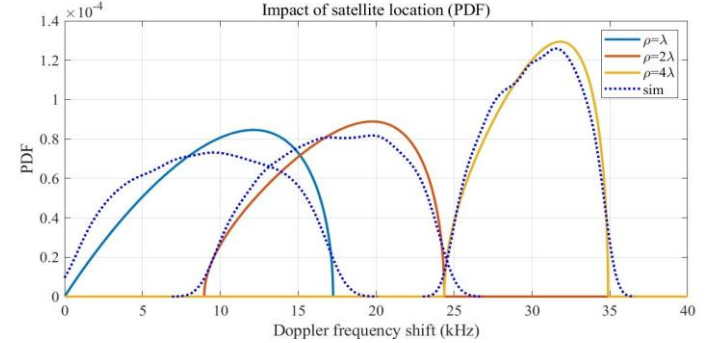


그림 2. 위성 위치(ρ_t)변화에 따른 도플러 변이 크기의 PDF.

도플러 변이 공식과 MCP 도플러 특성화를 통하여 클러스터 내부의 임의의 사용자가 겪는 도플러 변이 크기에 대한 PDF 를 도출한다. 분석의 정확성은 시뮬레이션과의 비교를 통해 나타냈다. 또한 클러스터의 반지름이 커지거나 하위 위성 지점이 클러스터 중심과 멀어질수록 도플러 변이의 크기가 증가하는 것이 확인된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (NRF-2022R1F1A1065367 and NRF-2022R1A4A3033401), and in part under the ITRC (Information Technology Research Center) support program (IITP-2021-0-02046).

참 고 문 헌

- [1] S. Liu, Z. Gao, Y. Wu, D. W. Kwan Ng, X. Gao, K.-K. Wong, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, "LEO satellite constellations for 5G and beyond: How will they reshape vertical domains?" IEEE Commun. Mag., vol. 59, no. 7, pp. 30-36, Jul. 2021.
- [2] T. A. Khan and M. Afshang, "A stochastic geometry approach to Doppler characterization in a LEO satellite network," IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC), pp. 1-6, 2020.
- [3] C. Saha, M. Afshang, and H. S. Dhillon, "3GPP-inspired HetNet model using Poisson cluster process: Sum-product functionals and downlink coverage," IEEE Trans. Commun., vol. 66, pp. 2219-2234, May 2018.
- [4] 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.
- [5] A. M. Mathai, An introduction to geometrical probability: distributional aspects with applications, vol. 1. CRC Press, 1999.