

저궤도 위성 네트워크 커버리지 분석 서베이

최은성¹, 유승형², 김선규³, 최준일¹, 최진석^{1*}한국과학기술원¹, 울산과학기술원², 충남대학교³

Survey of Low Earth Orbit Coverage Analysis

Eunsung Choi¹, Seunghyeong Yoo², Sungyu Kim³, Junil Choi¹, Jinseok Choi^{1*}

Key Words : Low Earth Orbit Satellite (저궤도 위성), Poisson Point Process (푸아송 포인트 프로세스), Rate Coverage Probability (전송률 커버리지 확률)

서론

위성 통신은 대량의 채널 용량과 함께 전 세계적인 통신 커버리지를 보장할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 보편적으로, 저궤도 위성 네트워크는 다수의 원형 궤도 하에 위성을 배치하는 모델로 설계되었다. 저궤도 위성은 정지궤도 위성에 비해 작은 커버리지로 인해 많은 수의 위성을 확보하는 것이 중요하다. 하지만 이러한 저궤도 위성 네트워크 모델의 커버리지 성능을 평가하기 위해서는 복잡한 수준의 시뮬레이션을 요구하므로 분석이 제한적이다. 따라서 최근에는, 푸아송 포인트 프로세스 (PPP)를 이용한 모델링을 이용해 위성 네트워크의 커버리지에 대해 분석하려는 시도가 있었다. 이러한 연구는 위성 네트워크에서의 위성 배치 전략에 대한 핵심 시스템 통찰력을 제공하였다^(1~3). 커버리지에 대한 분석은 지상망과 위성망을 함께 고려하는 시스템으로도 확장되었으며, 더 확장된 시스템에서의 분석적 연구가 제안되었다⁽⁴⁾. 본 논문에서는, 위성 네트워크에서 PPP를 이용한 커버리지 분석에 대해 진행된 연구에 대해 조사한다.

본론

본 논문에서는 다운링크 위성 통신 네트워크 및 채널 모델에서 커버리지에 대해 분석한 논문에 대해 조사한다. R_E 는 지구의 반지름이며, 사용자의 위치는 지구 표면과 독립적이고 동질성을 가진 PPP로 모델링한다. 또한 h 를 위성의 고도로 두어 위성 궤도의 반지름 $R_S = R_E + h$ 로 정의한다. 위성들의 위치 또한 반지름이 R_S 인 구의 표면과 독립적이고 동질성을 가진 PPP들로 모델링한다.

본 논문에서는 중심이 $\mathbf{0} \in \mathbb{R}^3$ 이고 반지름이 R_S 인 구의 표면을 $\mathcal{S}_{R_S}^2 = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3: \|\mathbf{x}\|_2 = R_S\}$ 로 정의한다. 또한 고도가 θ 이며 방위각이 ϕ 인 극 좌표의 점 벡터를 $\mathbf{x} \in \mathcal{S}_{R_S}^2$ 로 정의한다. 다음으로, 동질성을 가진 구체의

PPP (SPPP)인 $\Phi = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N\}$ 를 고려한다. 본 논문에서는 일반 유저를 \mathbf{u}_1 으로 표시한다. 본 논문은 일반 사용자 관점에 해당하는 구체의 캡을 $\mathcal{A} \subset \mathcal{S}_{R_S}^2$ 로 정의한다. 또한 일반 사용자와의 거리가 위성 사용자와의 거리 r 보다 짧고 \mathcal{A} 의 점을 포함하는 하위 구체 캡을 \mathcal{A}_r 로 정의한다. 무선 채널의 페이딩 효과를 고려하여, α 를 경로 손실 지수로 모델링한다. m 은 나카가미- m 페이딩 지수이며, \mathcal{L}_{I_r} 은 통합 간섭 파워의 라플라스 변환 형태이다.

동질성을 가진 채널에서의 커버리지 확률

우선적으로, 동질성을 가진 채널에서 확률 기하학 테크닉을 활용하여 위성 네트워크의 커버리지 확률을 분석하였다. 나카가미- m 페이딩 시나리오에서 PPP를 이용해 유도된 커버리지 확률은 다음과 같다⁽¹⁾.

$$P_{\text{SIR}}^{\text{cov},A}(\gamma; \lambda, \alpha, R_S, m) \quad (1)$$
$$= \sum_{k=0}^{m-1} \frac{m^k \gamma^k (-1)^k}{k!} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^{\alpha k} \frac{d^k \mathcal{L}_{I_r|\Phi(\mathcal{A})>0}(s)}{ds^k} \Big|_{s=m\gamma r^\alpha}$$
$$\times v(\lambda, R_S) r e^{-\lambda \pi \frac{R_S}{R_E} r^2} dr (1 - e^{-\lambda 2\pi (R_S - R_E) R_S})$$

수식에 관한 자세한 설명은 참조된 논문에서 확인할 수 있다. 유도된 모델은 다양한 위성 구성과 사용자 분포를 고려할 수 있으며, 네트워크 성능 평가에 있어서 중요한 지표인 신호 대 잡음비 (SNR)와 커버리지 확률을 예측할 수 있다.

쉐도잉 효과를 고려한 모델로의 확장

보편적인 위성 통신 환경의 운영 주파수는 Ku-Ka (12~40 GHz) 대역이기 때문에 가시선 (LoS)과 비가시선 (NLoS) 경로가 모두 고려되어야 한다. 따라서 쉐도잉 효과를 고려한 모델로 확장하였을 때의 커버리지 확률은 다음과 같이 유도되었다⁽²⁾.

$$P_{\text{SIR}}^{\text{cov}}(\gamma; \lambda, \alpha, R_S, m) = \quad (2)$$

$$2\pi\lambda \frac{R_S}{R_E} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \left(p_{\text{LOS}}(r) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(-m)^k \gamma^k r^k \alpha^{\text{LOS}}}{k!} \frac{d^k \mathcal{L}_{I_r}(s)}{ds^k} \Big|_{s=m\gamma r^{\alpha^{\text{LOS}}}} + (1 - p_{\text{LOS}}(r)) \mathcal{L}_{I_r}(z) \Big|_{z=\gamma r^{\alpha^{\text{NLOS}}}} \right) r dr.$$

유도된 커버리지 확률 모델은 신호 대 간섭 비 (SIR) $\gamma > 0$ dB에 대해 정확하기 때문에 중간에서 높은 신호 대 간섭 및 잡음비 (SINR)에 대한 시스템 레벨의 위성 네트워크에 대한 통찰력을 제공한다.

일반적인 시스템 조건으로의 확장

쉐도잉 효과를 고려한 모델을 통해 유도된 커버리지 확률의 하한을 도출하여 빔게인 등 일반적인 시스템 조건들을 포함 가능하도록 추가적인 연구가 진행되었다⁽³⁾. 또한 가까운 위성의 연합 규칙이 적용된 시나리오에서 커버리지 확률은 다음과 같이 유도된다.

$$P_{\text{SIR}}^{\text{cov}}(\gamma; \lambda, \alpha, R_S, m) = \bar{v}_n(\lambda, R_S) \quad (3)$$

$$\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \left(p_{\text{LOS}}(r) \sum_{k=0}^{m-1} \frac{m^k \gamma^k r^k \alpha^{\text{LOS}}}{k!} (-1)^k \frac{d^k \mathcal{L}_{I_r}(\Phi(\mathcal{A}) > 0, r(s))}{ds^k} \Big|_{s=m\gamma r^{\alpha^{\text{LOS}}}} + p_{\text{NLOS}}(r) \mathcal{L}_{I_r}(\Phi(\mathcal{A}) > 0, r(z)) \Big|_{z=\gamma r^{\alpha^{\text{NLOS}}}} \right) re^{-\lambda \pi \frac{R_S r^2}{R_E}} dr$$

이러한 접근 방식은 다양한 네트워크 파라미터를 고려하여 위성 네트워크의 성능을 예측할 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 이론적 결과의 정확성을 검증한다.

위성망과 지상망을 모두 고려하는 시스템

최근에는, 위성-지상 통합 네트워크 (STINs)로 통합된 모델링에 대한 연구 또한 진행되었다⁽⁴⁾. 위성 및 지상 네트워크의 특성을 하나의 분석 프레임워크 내에서 공동으로 포착하기 위한 새로운 네트워크 모델이 제안되었다. 통합된 모델에 대한 커버리지 확률은 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} \mathbb{P}[R_{\text{STIN}} > \gamma] \\ = P_{\text{cov}}^{\text{cov}}(\gamma, \lambda_o, \beta_o, m_o, f_{H_o}, P_o, B_o, G_o, \bar{G}_o, R_S, R_E) \\ = P_S^{\text{cov}} + P_T^{\text{cov}} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 P_S^{cov} 와 P_T^{cov} 는 각각 위성과 지상국의 커버리지 확률이다. 도출된 위성-지상 통합 네트워크의 커버리지 확률 모델은 Fig. 1.에서 실제 시뮬레이션과 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 1.에서 β_S 는 STINs 위성 네트워크에 대한 경로 손실 지수이다.

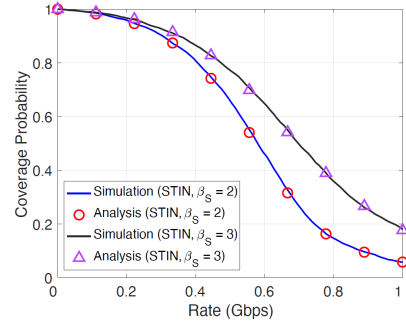


Fig. 1. Validation of the rate coverage analysis⁽⁴⁾

본 논문에서는 확률 기하학 테크닉을 활용하여 위성 네트워크의 커버리지에 대해 분석하는 방법들을 조사하였다. 우선, PPP를 통해 위성 시스템을 모델링하여 closed-form 형태의 커버리지 확률을 유도하였다. 가시선과 비가시선 경로를 모두 고려하여, 쉐도잉 효과가 포함된 모델로 확장하였다. 또한, 확장된 모델에서 커버리지 확률의 하한을 통해 보편적인 위성 시스템의 조건들을 포함 가능하도록 하는 연구가 진행되었다. 마지막으로, STINs에서 위성망과 지상망이 통합된 모델링을 통해 커버리지 확률에 대한 분석이 이루어졌으며, 시뮬레이션과 분석 값이 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-22-040, 이종 위성군 우주 감시정찰 기술 특화연구센터)

참고문헌

- 1) Park, J. H., Choi, J. S., and Lee, N. Y., "A Tractable Approach to Coverage Analysis in Downlink Satellite Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 22, No. 2, 2023, pp. 793–807.
- 2) Choi, J. S., Park, J. H., Lee, J. S., and Lee, N. Y., "Coverage Analysis for Downlink Satellite Networks: Effect of Shadowing," IEEE International Conference on Communications (ICC), Rome, Italy, 2023, pp. 2601–2606.
- 3) Kim, S. G., Yoo, S. H., Choi, J. S., "Downlink Satellite Network Analysis with Beam Gain in Shadowing Channel," International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, 2023.
- 4) Park, J. H., Choi, J. S., Lee, N. Y., Baccelli, F., "Unified modeling and rate coverage analysis for satellite-terrestrial integrated networks: Coverage extension or data offloading?," arXiv preprint arXiv:2307.03343, 2023.