

# 공중망 이동에 따른 네트워크 토폴로지 변화를 반영한 확률적 서빙 거리 분석 기법

고동연, 최완\*

한국과학기술원, \*서울대학교, 뉴미디어통신공동연구소

romtae@kaist.ac.kr, \*wanchoi@snu.ac.kr

## Probabilistic Serving Distance Analysis Reflecting Network Topology Variation according to Movement of Flying Base Stations.

Dongyeon Ko, Wan Choi\*

KAIST, \*Seoul National University.

요약

본 논문은 다중 이동형 공중망이 존재하는 네트워크 환경에서 기존 서빙 공중 기지국의 이동에 따른, 시공간 상관 네트워크 토폴로지를 개발하였다. 구체적으로는, 기존 서빙 공중 기지국의 이전 위치, 속도에 따라 이동할 수 있는 방향을 모두 정의하였고 공중망들의 이동에 따른 핸드오버 확률을 유도하였으며 궁극적으로, 기존 서빙 공중 기지국의 이동한 위치에 따른 새로운 확률적 서빙 거리 분포를 도출했다는 점에 의의가 있다.

### I. 서론

다가오는 6G 시대에 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN)의 필요성이 강조됨에 따라, UAV와 같은 비행 공중망(Flying Base Station, FBS)은 기존 커버리지를 확장하고 사용자에게 유비쿼터스한 서비스를 제공할 수 있다고 기대된다. 이에 따라, 기존 고정형 지상망에서처럼 단순 스냅샷에서의 분석이 아닌, 시간의 흐름에 따라 변화하는 네트워크 토폴로지 상관계를 고려하여, 적절한 핸드오프를 통한 링크 할당이 필요하다. 궁극적으로, 본 논문에서는 서빙 공중망의 이동 경로를 살펴봄과 동시에 랜덤하게 움직이는 다중 공중망들을 고려하여 공간적 네트워크 변화를 반영하여 핸드오버 확률을 유도하고 및 서빙 거리 분포를 확률적으로 새로이 도출한다.

### II. 시스템 모델

본 시스템 모델에서는 [그림 1]과 같이  $M$  개의 FBS들이  $o = (0, 0, 0)$ 에 위치한 기준 사용자로부터 거리  $U$  이내에 있으면서 임의의  $t = t_0$  시점에서 이항분포과정(BPP)에 따라 반구 내에 생성되어 위치하고 있는 상황을 고려한다. 또한, 기준 사용자가 FBS들과 최대 통신이 가능한 범위를  $r_{\max} (< U)$ 라고 가정하고, 수신할 수 있는 빔폭은  $2\phi_{\text{beam}}$ 라고 가정한다. 이 때, 기준 사용자가 통신할 수 있는 영역을  $A_{\text{comm}} = C_{o, r_{\max}, \phi_{\text{beam}}}^3$  ([그림 1]의 노란색 영역)로 기호화할 수 있고,  $t = t_0$  시점에서 기준 사용자와 가장 가까운 FBS가 서비스할 때, 해당 서빙 FBS의 위치  $x_s(t_0)$ 를  $(r, \phi, \theta)$  극좌표로서 표현할 수 있다. (단,  $D_s(t_0) = \|x_s(t_0) - o\| = r$ ,  $\phi$ : 극각,  $\theta$ : 방위각) 기존 서빙 FBS가  $v$ 의 속도로 랜덤한 방향으로 움직이며, 핸드오프가  $\Delta t$ 마다 일어난다고 했을 때,  $t = t_0 + \Delta t$ 에서의 기준 서빙 FBS의 위치는 다음의 극좌표로 표현 가능하다.

$$x_{\text{mov}}(t_0 + \Delta t) = (r_{\text{mov}}, \phi_{\text{mov}}, \theta_{\text{mov}})$$

(단,  $r_{\text{mov}} = \sqrt{(r \sin \phi \cos \theta + v \Delta t \sin \psi \cos \omega)^2 + (r \sin \phi \sin \theta + v \Delta t \sin \psi \sin \omega)^2 + (r \cos \phi + v \Delta t \cos \psi)^2}$ )이며,  $\psi$ :

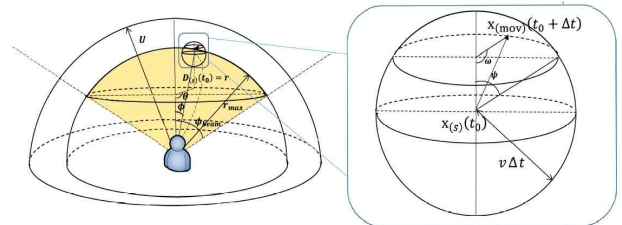
극각을 따라 이동하는 방향,  $\omega$ : 방위각을 따라 이동하는 방향

또한, 서빙 FBS의 고도는 다음과 같다.

$$H(x_{\text{mov}}(t_0 + \Delta t)) = r \cos \phi + v \Delta t \cos \psi$$

이 때, 서빙 FBS가 존재할 수 있는 영역은  $H(x_{\text{mov}}(t_0 + \Delta t)) \geq 0$

이므로, 기존 서빙 FBS로부터 이동방향을 나타내는  $\psi, \omega$ 에 대한 조건부 분포는 다음의 보조정리 1로부터 유도할 수 있다.



[그림 1]. 기준 사용자에게 대한 이동형 공중망 네트워크

### III. 분석

보조정리 1)  $x_s(t_0), v, \Delta t$ 가 주어졌을 때,  $\psi, \omega$ 의 확률밀도함수(PDF)는 다음과 같이 주어짐.

$$f_{\psi, \omega}(\psi, \omega) = \begin{cases} \frac{\sin \psi}{4\pi} & \text{if } r \cos \phi \geq v \Delta t \dots \textcircled{1} \\ \frac{v \Delta t \sin \psi}{2\pi(v \Delta t + r \cos \phi)} & \text{if } r \cos \phi < v \Delta t \dots \textcircled{2} \end{cases}$$

(①에 대하여  $0 \leq \psi \leq \pi, 0 \leq \omega \leq 2\pi$ , ②에 대하여

$0 \leq \psi \leq \arccos(\frac{-r \cos \phi}{v \Delta t}), 0 \leq \omega \leq 2\pi$  성립)

다음으로,  $t = t_0 + \Delta t$  시점에서 기준 서빙 기지국의 위치가 최대 통신 가능 영역 내에 있을 사건을 다음과 같이 정의한다.

$$B = \{r_{\text{mov}} \leq r_{\max}\} \cap$$

$$\left\{ 0 \leq \arccos\left(\frac{H(x_{\text{mov}}(t_0 + \Delta t))}{\|x_{\text{mov}}(t_0 + \Delta t) - o\|}\right) < \phi_{\text{beam}} \right\}$$

이 때, 최대 통신 가능 영역 내에  $N(A_{\text{comm}}) = k (\leq M - 1)$ 개의 다

른 FBS들이 있을 때,  $t = t_0 + \Delta t$  에서 핸드오프가 일어날 확률은 다음의 각 경우들에 따라 다르게 나타날 수 있다.

Case 1)  $B$  조건을 만족하고  $N(A_{comm}) = 0$

Case 2)  $B$  조건을 만족하고  $N(A_{comm}) = k (\geq 1)$

Case 3)  $B^c$  조건을 만족하고  $N(A_{comm}) = k (\geq 1)$

$t = t_0$  시점에서 나머지 FBS들은 랜덤한 속도와 방향으로 움직이므로  $t = t_0 + \Delta t$  시점에서  $k$  개의 FBS들이 랜덤하게 보이는 상황을 고려하여 다음의 보조정리를 제시한다.

보조정리 2)  $x_s(t_0)$  및  $x_{mov}(t_0 + \Delta t)$ 가 주어졌을 때, 핸드오프 확률은 다음과 같음

$$\Pr[\text{핸드오프 발생}] = \begin{cases} 0 & \text{if Case 1} \\ 1 - (1 - \frac{r_{mov}^3}{r_{max}^3})^k & \text{if Case 2} \\ 1 & \text{if Case 3} \end{cases}$$

위의 보조정리 2에 의해 다음의 정리에서는  $t = t_0 + \Delta t$  에서 각 Case들에 따른 서빙 거리 분포를 확률적으로 정의한다.

정리 1)  $x_s(t_0)$  및  $x_s(t_0 + \Delta t)$ , 가 주어지고  $F = C_{o,r_{mov},\phi_{beam}}^3$  일 때,  $t = t_0 + \Delta t$ 에서의 서빙 거리 CDF는 다음과 같이 주어짐.

$$\Pr[D_s(t_0 + \Delta t) \leq d | \text{Case 1}] = \begin{cases} 0 & \text{if } d < r_{mov} \\ 1 & \text{if } d \geq r_{mov} \end{cases}$$

$$\Pr[D_s(t_0 + \Delta t) \leq d | \text{Case 2}, N(F) = 0] = \begin{cases} 0 & \text{if } d < r_{mov} \\ 1 & \text{if } d \geq r_{mov} \end{cases}$$

$$\Pr[D_s(t_0 + \Delta t) \leq d | \text{Case 2}, N(F) = i] = 1 - (1 - \frac{d^3}{r_{mov}^3})^k$$

(단,  $0 < d < r_{max}$  and  $1 \leq i \leq k$ )

$$\Pr[D_s(t_0 + \Delta t) \leq d | \text{Case 3}] = 1 - (1 - \frac{d^3}{r_{max}^3})^k$$

(단,  $0 < d < r_{max}$ )

정리 1에 근간하여, 이전 스냅샷과 상관 관계가 있는 변화된 네트워크 토폴로지에서 발생 가능한 모든 경우들에 따라 확률적으로 서빙 거리를 다르게 정의할 수 있다.

#### IV. 결론 및 향후 연구 제언

본 논문에서는 다수의 이동형 공중망이 존재하는 상황에서 서빙 FBS의 이동 영역을 정의함과 동시에 이전 스냅샷과의 토폴로지 변화를 통해 새로운 서빙 거리 분포를 유도하였다. 향후 연구에서는 무선 채널 환경에 따른 간섭 모델링을 바탕으로, 공중망 이동속도 및 핸드오버 시기에 따른 커버리지 확률을 분석하고자 한다.

#### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구 센터지원사업의 연구결과들로 수행되었음(IITP-2021-0-02048, IITP-2020-0-01787)

#### 참 고 문 헌

[1] S. krishnan and H. S. Dhillon, "Effect of user mobility on the

performance of device-to-device networks with distributed caching," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 6, no. 2, pp. 194 - 197, Apr. 2017.

[2] M. Banagar and H. S. Dhillon, "3GPP-inspired stochastic geometry-based mobility model for a drone cellular network," in Proc. IEEE Global Commun. Conf., Dec. 2019, pp 1-6.