6G 이동통신시스템을 위한 주파수 공유형 초지향성 네트워크의 성능분석

염정선, 정방철
충남대학교
jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Analysis of Spectrum-Shared Highly-Directional Wireless Network for 6G Mobile Communication Systems

Jeong Seon Yeom and Bang Chul Jung
Chungnam National University

요 약

본 논문은 동일 주파수 대역을 사용하는 1차 네트워크와 2차 네트워크가 공존하며 모든 송수신단이 지향성 안테나를 사용하는 주파수 공유형 지향성 네트워크의 전송 성공 확률 (coverage probability)을 수학적으로 분석한다. 구체적으로 확률 기하를 기반으로 시스템을 모델링하며 1차 네트워크 주변에 2차 네트워크의 송신단이 존재하지 못하는 배타지역을 설정하여 1차 네트워크에 미치는 간섭량을 감소시킨다. 안테나 방사 이득은 실제 uniform linear array 안테나를 고려하되 수학적 분석을 위해서 계단형 근사법으로 근사화하며 열린 형태의 함수의 하한을 고려하여 1차 네트워크의 전송 성공 확률을 닫힌 형태의 수식으로 유도한다. 시뮬레이션 결과를 통해 본 논문에서 수학적으로 유도한 전송 성공 확률이 거의 정확함을 보인다.

Ⅰ. 서 론

현재 5G의 상용화와 더불어 6G의 핵심기술들이 구체화되고 있다. 6G 역시 넓은 주파수 대역폭을 얻기 위해 밀리미터 대역 혹은 그 이상의 높은 주파수 대역이 고려되고 있다. 높은 주파수 대역의 사용은 안테나의 크기를 감소시켜 밀집화된 안테나 시스템을 가능하게 하여 높은 지향성 안테나 이득을 제공한다. 이는 높은 주파수 대역의 큰 경로 감쇄를 보완할 수 있으며, 상대적으로 낮은 송수신 안테나의 부엽 이득은 원치 않는 방향으로 송수신된 간섭 신호의 전력을 줄일 수 있다 [1].

본 논문에서는 주파수 공유형 네트워크에서 이러한 지향성 안테나의 이점을 이용하여 2차 네트워크 (secondary network)에서 1차 네트워크 (primary network)로의 간섭 완화를 고려한다. 추가로 경로 손실로 인한 2차 네트워크의 간섭을 완화하는 배타지역 (exclusion zone)을 고려한다 [2]. 1차 네트워크의 성능을 수학적으로 분석하기 위해 지향성 안테나의 방사 패턴을 양자화 근사를 하며 이로부터 닫힌 형태 (closed-form)의 전송 성공 확률 (coverage probability) 수식을 유도한다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 전송 성공 확률 분석

본 논문의 시스템 모델은 확률 기하 이론에 기반하여 2차 네트워크의 송신단들 (secondary transmitter, ST i ($i \in \{1,2,\ldots,\Lambda\}$))을 2차원 공간상에 $\lambda(/\mathrm{km}^2)$의 동일 밀도로 포아송 점과정 (Poisson point process)으로 모델링한다. 1차 네트워크의 수신단 (primary receiver, PR)은 2차원 공간상의 원점에 존재한다고 가정할 수 있으며 주변 반경 R_{E} 이내를 2차 네트워크에 대한 배타지역으로 설정한다. 1차 네트워크의 수신단에 대한 채널 모델은 1차 네트워크 송신단 (primary transmitter, PT)에 대해서 거리 d_{o} 및 Nakagami-m 페이딩 채널, h_o,를 고려하며 2차 네트워크의 i 번째 송신단에 대해서는 거리 d_i 및 Rayleigh 페이딩 채널, h_i,를 고려한다.

송수신 지향성 안테나의 방사 이득 및 방향은 다음과 같이 모델링된다. 본 논문에서는 다음과 같은 방사 이득을 갖는 N 개의 안테나 요소로 이루어진 uniform linear array (ULA) 안테나를 고려한다.

$$G_{\mathrm{act}}(\phi_u) = \frac{\sin^2(\pi N d_s \sin(\phi_u)/L)}{N\sin^2(\pi d_s \sin(\phi_u)/L)}, \quad (1)$$

여기서 ϕ_u는 u ($\in \{\mathrm{PT},\mathrm{PR},1,2,\ldots,\Lambda\}$)로 구분되는 1차 네트워크의 송신단 혹은 간섭원인 2차 네트워크의 송신단에 대해서는 신호의 출발각이며 1차 네트워크의 수신단에 대해서는 도착각이다. 안테나 이격거리 및 반송파 주파수의 파장은 각각 d_s와 L로 표현되며 $d_s = L/2$로 가정한다. 분석을 위해 각도에 대해서 $\Delta\phi$의 등간격으로 양자화하는 방법인 계단형 근사법 (stepwise approximation)을 통해 근사화된 방사 이득 $G_{\mathrm{a}}(\phi_u)$를 정의한다. 모든 송수신단 안테나의 방향은 송수신단 쌍 간에 완벽하게 정렬되어 있고 $[-\pi,\pi]$의 균등 분포 (uniform distribution)를 따른다고 가정한다.

위의 송수신단 분포 모델 및 무선 채널, 안테나 방사 이득 모델을 고려하여 1차 네트워크의 수신단에 수신되는 1차 네트워크의 신호의 전력 혹은 간섭 신호의 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_l = P_t |h_l|^2 G_{\mathrm{a},t}(\phi_{l,\mathrm{PR}}) G_{\mathrm{a},r}(\phi_{\mathrm{PR},l}) d_l^{-\alpha}, \text{ for } l \in \{\mathrm{PT},1,2,\ldots,\Lambda\}, \quad (2)$$

여기서 P_t는 송신 전력, h_l은 페이딩 채널 그리고 $G_{\mathrm{a},t}$ 및 $G_{\mathrm{a},r}$은 근사화된 송신 및 수신 안테나 방사 이득을 각각 나타낸다. 각도 $\phi_{\mathrm{a,b}}$는 점 a에서 점 a의 지향 방향 (안테나 방향)을 기준으로 점 b가 위치한 각도를 의미하며 α는 경로 감쇄 지수이다.

전송 성공 확률 P_c는 목표 전송률 R에 대한 신호 대 간섭·잡음 비 (signal-to-noise-plus noise ratio, SINR)의 임계값 $\beta := 2^R - 1$으로부터 다음과 같이 주어진다. 이때, 열 잡음의 전력 밀도는 N_0로 가정한다.

$$P_c = \Pr\{\mathrm{SINR} \geq \beta\} = \Pr\left\{ \frac{P_t |h_{\mathrm{o}}|^2 G_{\mathrm{a},t}(0) G_{\mathrm{a},r}(0) d_{\mathrm{o}}}{\sum_{i=1}^{\Lambda} P_t |h_i|^2 G_{\mathrm{a},t}(\phi_{i,\mathrm{PR}}) G_{\mathrm{a},r}(\phi_{\mathrm{PR},i}) d_i + N_0} \geq \beta \right\}. \quad (3)$$

식 (3)의 풀이과정에 있어서 모양 매개변수 m과 크기 매개변수 $1/m$을 갖는 Gamma 분포의 상호 누적 분포 함수에 대한 하한인 $(1-\exp(-\tau x))^m$ ($\tau = m(m!)^{-1/m}$)과 Gauss hyper-geometric 함수 ${}_2F_1(1,2;1+t;z)$의 하한인 $(1-z)^{t-2}$을 고려하여 식 (4)와 같이 닫힌 형태의 전송 성공 확률을 얻는다.

$$P_c \approx \sum_{n=1}^{m} (-1)^{k+1} \binom{m}{n} \exp\left(-n\tau s N_0 - \lambda\pi \right.$$
$$\left. \times \mathbb{E}_{G_{a,t},G_{a,r}}\left[-\frac{n\tau\rho R_{\mathrm{E}}^{2-\alpha}}{n\tau\rho R_{\mathrm{E}}^{-\alpha}+1} + \frac{n\tau\rho R_{\mathrm{E}}^{2-\alpha}}{(1-2/\alpha)\left(n\tau\rho R_{\mathrm{E}}^{-\alpha}+1\right)^{1-2/\alpha}} \right] \right) \quad (4)$$

여기서 $\rho = \beta G_t G_r / \left(N^2 d_{\mathrm{o}}^{-\alpha}\right)$이다. 식 (4)의 $\mathbb{E}_{G_t,G_r}[\cdot]$은 G_t와 G_r이 양자화된 모든 방사 이득에 대해서 상수의 확률을 갖는 이산 분포이므로 간단하게 풀이된다.

Ⅲ. 모의실험 결과 및 결론

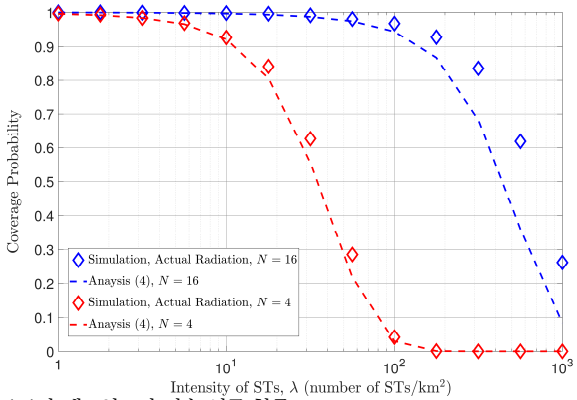

그림 1 1차 네트워크의 전송 성공 확률, $\Delta\phi = 1^\circ$, $R_{\mathrm{E}} = 200\mathrm{m}$, $d_{\mathrm{o}} = 150\mathrm{m}$.

그림 1은 빔 근사화 파라미터 $\Delta\phi = 1^\circ$ 일 때 모든 송수신단의 안테나 개수가 4개, 16개 경우, 2차 네트워크 송신단의 밀도에 대한 1차 네트워크의 전송 성공 확률을 보여준다. 안테나 개수가 증가할수록 안테나 방사 이득의 주엽이 더 첨예해지기 때문에 원하는 신호를 더 높은 전력으로 송신할 수 있으며 이에 따라 전송 성공 확률도 증가하게 된다. 수학적 분석 결과는 시뮬레이션 결과와 유사하게 일치하는 것을 확인할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (2019-0-00964, 스펙트럼 챌린지를 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발)

참 고 문 헌

[1] S. Singh *et al.*, "Interference analysis for highly directional 60-GHz mesh networks: The Case for Rethinking Medium Access Control," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 19, no. 5, pp. 1513-1527, Oct. 2011.

[2] J. S.Yeom *et al.*, "Performance analysis of satellite and terrestrial spectrum-shared networks with directional antenna," *Wiley ETRI Journal*, vol. 42, no. 5, pp. 712-720, Oct. 2020.