

# 마턴 하드 코어 프로세스를 이용한 지향성 안테나 기반 무선 네트워크 성능 분석

추 은 미\*, 이 형 주\*, 강 인 웅\*, 정 방 철\*

## Performance Analysis of Directional Wireless Networks Based on Matern Hard-Core Processes

Eunmi Chu\*, Hyungjoo Lee\*,  
 In-Woong Kang\*, Bang Chul Jung\*

### 요 약

본 논문은 지향성 안테나를 사용하는 간섭 노드들을 마턴 하드 코어 프로세스 (Matern Hard-Core Process; MHCP) 기반으로 생성하여 무선 네트워크를 구성 한다. MHCP의 하드 코어 거리( $\delta$ )에 의해서 간섭 노드 밀도가 결정 되며, 지향성 안테나의 특성에 따라 간섭 신호와 수신 신호 전력이 결정 된다. 지향성 안테나는 이상적 섹터 안테나로 가정하고, 시뮬레이션을 통해 일반 수신 노드 (Typical Receiver)에서 간섭 신호의 누적 분포 함수 (Cumulative Distribution Function, CDF), 신호 대 간섭과 잡음 비 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)의 CDF, 전송 성공 확률에 대한 성능을 분석한다.

**Key Words** : Directional antenna, Matern hard-Core process (MHCP), interference, stochastic geometry

### ABSTRACT

In this letter, we consider that a directional wireless network consisting of interference nodes based on Matern hard-core process (MHCP). The density of

interference nodes is determined by the hard-core distance  $\delta$  of MHCP. The received power of interference signal and desired signal is determined by the characteristics of directional antennas. We assume the ideal sector antennas in this letter. Through extensive computer simulations, we show the cumulative distribution function (CDF) of the interference, the CDF of SINR, and the transmission success probability at the typical receiver.

### 1. 서 론

최근 무선 네트워크에서 간섭을 모델링하는 기법으로 확률 기하 (Stochastic Geometry, SG) 이론이 개발되었다<sup>1)</sup>. 확률기하 이론은 간섭을 일으키는 통신 노드들과 수신 노드의 거리가 간섭에 미치는 영향을 통계적으로 분석하기 위하여 도입되었다. 일반적으로 확률 기하 이론에서는 간섭을 일으키는 노드들의 위치를 2차원 포아송 프로세스 (Poisson Point Process, PPP)로 모델링하고 수신 노드에서 간섭 노드들로부터 도착하는 신호의 전력을 더하여 간섭의 통계적 특성을 도출한다. 이 경우 간섭 노드들이 매우 인접할 경우 간섭 신호가 급격히 증가하여 통신 성능이 열화된다. 따라서, 실제 무선 네트워크에서는 간섭 노드가 존재할 수 있는 최소 거리를 적용하여 간섭 양을 조절한다. 실제 무선 네트워크의 이런 특성을 반영하는 모델링 기법으로 마턴 하드 코어 프로세스 (Matern hard-core process, MHCP)가 무선 네트워크 모델링에 많이 사용되고 있다<sup>2)</sup>. MHCP에서는 간섭이 존재할 수 있는 최소 거리를 하드 코어 거리( $\delta$ )라 부른다.

한편, 최근 무선네트워크에서 송수신기가 지향성 안테나를 활용했을 때 확률기하 이론을 이용하여 무선 네트워크의 전송률 (Throughput)을 분석하는 연구가 진행되었고 지향성에 의한 성능 개선을 보여 주고 있다<sup>1)</sup>. 그러나, 지향성 무선네트워크에서 지금까지 연구된 확률기하이론 성능분석은 MHCP가 아닌 기존 PPP기반 분석이다<sup>3)</sup>. 최근 MHCP를 이용하여 지향성 무선네트워크를 분석하는 연구가 진행되었으나 간섭의 CDF만을 다루었다<sup>4)</sup>. 본 논문에서는 MHCP를 이

\* 이 연구는 국방과학연구소 (ADD)의 지원을 받았습니다. This research was supported by the Agency for Defense Development (ADD)

♦ First Author : Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, emchu@cnu.ac.kr, 정희원

◦ Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 종신회원

\* Agency for Defense Development (ADD), {lhj, iwkwang}@add.re.kr, 정희원

논문번호 : 201810-298-A-RE, Received September 26, 2018; Revised November 15, 2018; Accepted November 15, 2018

용하여 간접 노드를 배치하고, 간접 노드들이 지향성 안테나를 이용할 때, 발생하는 간접 신호의 CDF, SINR의 CDF, 전송 성공 확률을 시뮬레이션을 통하여 분석한다.

### II. 지향성 안테나를 고려한 시스템 모델

본 장에서는 지향성 안테나를 사용하는 MHCP 네트워크 모델을 설명한다. 네트워크 영역  $A$ 를 설정하고, 대표 수신 노드는 영역  $A$ 의 중심에 위치시킨다. 간접 노드들은  $A$  영역에 평균이  $N_p$ 가 되

는 PPP분포로 생성 되고, MHCP를 수행하기 위해 먼저 간접 노드들은 자신의 표식 값으로  $[0,1]$  사이의 랜덤 값을 부여 한다. 하드 코어 거리  $\delta$ 를 반경으로 설정하여 반경 내에 존재하는 간접 노드들의 표식 값과 자신의 표식 값을 비교하여 자신의 표식 값이 가장 작으면 네트워크에 잔류 시키고 그렇지 않으면 삭제 시킨다. MHCP를 수행을 마치면, 큰  $\delta$ 에 대해서는 MHCP의 간접 노드의 밀도는 아래의 식과 같이 감소하게 된다<sup>2)</sup>.

$$\lambda_m = \frac{1 - \exp(-\lambda_p \pi \delta^2)}{\pi \delta^2} \quad (1)$$

$\lambda_p$ 는 PPP분포를 따르는 간접 노드의 밀도로  $\lambda_p = N_p/A$ 가 된다.

지향성 안테나는 이상적인 섹터 (Ideal Sector) 안테나를 적용한다<sup>3)</sup>. 따라서 안테나 이득 패턴은 아래와 같다.

$$G(\theta) = \begin{cases} g_1 = \frac{2\pi - (2\pi - \omega)g_2}{\omega}, & \text{if } |\theta| \leq \frac{\omega}{2} \\ g_2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

수식 (2)에서  $g_1$ 와  $g_2$ 는 각각 메인 빔과 사이드 로브 빔 이득을 나타내고  $\omega \in (0, 2\pi)$ 는 빔 폭을 나타내고,  $\theta$ 는 송·수신 노드 쌍의 상대적 위상차를 나타낸다. 데이터를 송·수신하는 노드 쌍은 데이터 전송 전에 자신의 안테나 빔을 서로를 향하게 조절을 할 수 있기 때문에 송신 위상차  $\theta$ 와 수신 위상차  $\theta$ 는 모두 0°이 된다. 송신 안테나 이득  $G_T(\theta)$ 와 수신 안테나 이득  $G_R(\theta)$ 에  $\theta=0^\circ$ 를 대입하면 모두  $g_1$ 이 된다. 따라서  $i$ 번째 송·수신 노드 쌍의 데이터 신호의 수신 전력은 아래와 같다.

$$P_{i,i} = P_t G_T(0^\circ) G_R(0^\circ) d_{i,i}^{-\alpha} = P_t g_1^2 d_{i,i}^{-\alpha} \quad (3)$$

$P_t$ 는 전송 전력,  $d_{i,i}$ 는  $i$ 번째 송·수신 노드 사이의 거리,  $\alpha > 2$ 는 path-loss 감쇄 상수를 나타낸다.

간접 신호의 안테나 이득은 랜덤으로 발생된  $\theta$ 에 의해서  $G(\theta)$ 가 결정 된다.  $i$ 번째 일반적 수신 노드에서 수신된 간접 신호는 아래와 같다 (단,  $j \neq i$ ).

$$I_i = \sum_{j \neq i} P_{i,j} = \sum_{j \neq i} P_t G_T(\theta_j) G_R(\theta_i) d_{i,j}^{-\alpha} \quad (4)$$

식 (3)와 (4)으로부터  $i$ 번째 일반적 수신 노드에서의 SINR은 아래와 같다.

$$SINR_i = \frac{P_{j,j}}{I_i + W \cdot N_0} \quad (5)$$

$N_0$ 은 수신 잡음의 전력밀도 나타내고  $W$ 는 신호의 대역폭을 나타낸다. 성공적인 데이터 전송을 위해 요구되는 SINR이  $\beta$ 라면 전송 성공 확률은 아래와 같다<sup>4)</sup>.

$$P_s = \Pr \left\{ \frac{P_{j,j}}{I_j + W \cdot N_0} \geq \beta \right\} \quad (6)$$

### III. 시뮬레이션 결과

본 장에서는  $A$ 를 300km×300km로 가정하고,  $P_t$ 는 1Watt,  $\alpha$ 는 3.5,  $g_2$ 가 0.01,  $\delta$ 는 15km,  $d_{i,i}$ 는 300m,  $E[N_p]$ 는 150개, 빔폭  $\omega$ 는 10°, 30°, 60°, 120°, 360°로 설정한다. 시뮬레이션은 50,000번 수행 하였다.

그림 1은 빔폭  $\omega$ 에 따라 간접 신호의 CDF를 나타내고 수식 (4)에 의해 측정 되었다. 전방향 안테나인  $\omega=360^\circ$ 의 경우, 간접 신호의 CDF 곡선은 -105dB ~ -118dB 사이에 있다. 하지만,  $\omega=10^\circ$ 의 경우, CDF 곡선은 -150dB ~ -75dB 사이에 있다.  $\omega=10^\circ$ 에서는 간접 신호의 98%가  $\omega=360^\circ$ 에서의 간접 신호의 전력이 작다. 하지만, 극히 일부인 2%에 해당되는 간섭이 강한 간섭을 유발을 시킨다. 극히 일부이지만, 간접 신호 전력이 크기 때문에 평균 간섭량을 증가를 시키기 때문에 최악의 경우 전방향 안테나 보다 성능이 더 저하될 가능성도 있다. 따라서, 강한 간접 신호 제거가 하는 기술이 필요하다.

그림 2는 빔폭  $\omega$ 에 따라 SINR의 CDF를 나타내고

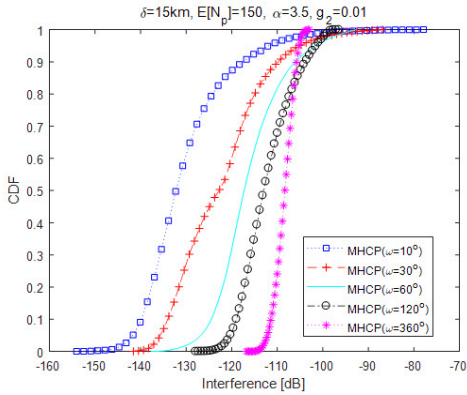


그림 1. 빔폭( $\omega$ )의 변화에 따른 간섭신호의 누적 분포 함수  
Fig. 1. CDF of interference according to beamwidth

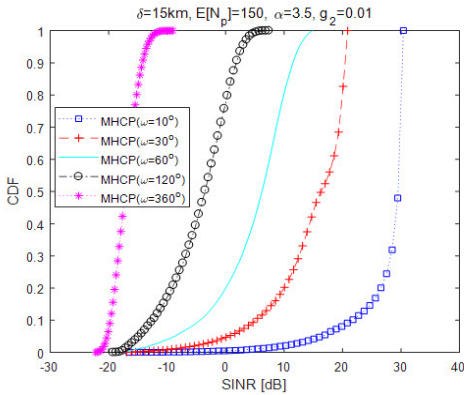


그림 2. 빔폭( $\omega$ )의 변화에 따른 SINR의 누적 분포 함수  
Fig. 2. CDF of SINR according to beamwidth

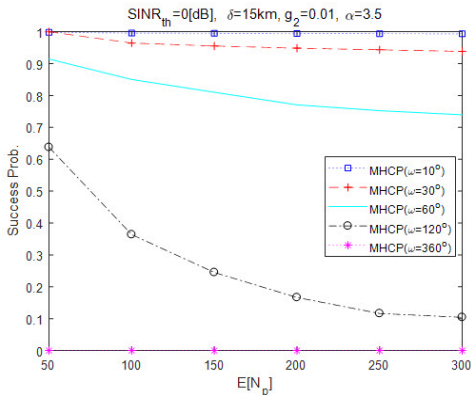


그림 3. 평균 노드 수의 변화에 따른 전송 성공 확률  
Fig. 3. Transmission Success Probability for varying  $E[N_p]$

수식 (5)에 의해 측정 되었다. 수식 (3)에 의해서 데이터 수신 신호의 전력이  $g_1^2$ 만큼 증가하기 때문에  $\omega$ 가

작아질수록 SINR이 증가한다. 그림1에서 발생된 극소수의 일부의 강한 간섭 신호보다 데이터 수신 신호의 증가량이 훨씬 크기 때문에 SINR이 향상 되었다.

그림 3은 A영역에 평균 노드수  $N_p$ 를 50에서 300까지 증가시킬 때, 전송 성공 확률을 수식 (6)에 의해 측정하였다. 간섭 노드 수가 증가하면 간섭 신호가 증가하기 때문에 전송 성공 확률이 감소한다. 그림 2에서도  $\omega=360^\circ$ 의 경우는 SINR의 최대값이 0이 되지 않기 때문에 전송 성공 확률이 0이 됨을 알 수가 있다.  $\omega=10^\circ$ 의 경우는 노드의 수와 관계없이 항상 성공함을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 지향성 안테나를 활용하는 무선네트워크에서 MHCP를 이용하여 간섭 신호의 CDF, SINR의 CDF, 전송 성공 확률을 분석하였다. 빔폭이 작으면 대부분의 간섭 신호는 약해지게 되나, 일부 간섭 신호가 매우 강하게 형성된다. 전반적으로 안테나 이득으로 인해 빔폭이 작을 때 SINR 성능이 더 향상됨을 확인할 수 있었다. 또한, 통신 노드의 밀도가 증가하면서 빔폭이 큰 경우에는 간섭의 양이 더욱 급격히 증가하기 때문에 전송 성공 확률도 감소함도 확인하였다.

#### References

- [1] J. Wildman, P. H. J. Nardelli, M. Latva-aho, and S. Weber, "On the joint impact of beamwidth and orientation error on throughput in directional wireless poisson networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 12, pp. 7072-7085, Dec. 2014.
- [2] M. Haenggi, "Mean interference in hard-core wireless networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 8, Aug. 2011.
- [3] E. Chu, J. S. Park, H. Lee, and B. C. Jung, "Interference analysis in poisson wireless networks with directional antennas," *J. KICS*, vol. 42, no. 12, pp. 2263-2266, 2017.
- [4] E. Chu, B. C. Jung, D. J. Jung, and H. Lee, "Interference analysis of directional wireless networks based on matern hard-core process," in *Proc. KICS Summer Conf.*, p. 269, Jun. 2018.