

지향성 안테나기반 포아송 무선 네트워크에서의 간섭 분석

추은미*, 박종성*, 이형주*, 정방철^o

Interference Analysis in Poisson Wireless Networks with Directional Antennas

Eunmi Chu*, Jong Sung Park*,
 Hyungjoo Lee*, Bang Chul Jung^o

요약

본 논문은 지향성 안테나를 활용한 무선 송수신기가 포아송 분포로 무작위적으로 분포하는 무선통신 네트워크에서 간섭의 통계적인 특성을 분석한다. 본 논문에서 제시한 이상적인 섹터 안테나 이득을 이용하여 일반적인 지향성 안테나 이득을 상한 근사화할 수 있음을 제시한다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 빔폭에 따른 포아송 무선 네트워크의 간섭의 통계적 특성을 보인다.

Key Words : Wireless networks, directional antenna, Poisson point process (PPP), interference, stochastic geometry

ABSTRACT

In this letter, we analyze interference of wireless networks where each transmitter and receiver is equipped with a directional antenna and is randomly distributed with Poisson point process. In particular, we exploit an ideal sector antenna gain as an upper-bound of gain of general directional antennas. Through extensive computer simulations, we illustrate the statistical characteristics of the interference according to beamwidth of the directional antennas.

I. 서론

최근 무선 네트워크는 통신 노드의 수와 무선 트래픽의 증가로 용량 증대가 요구되고 있다. 무선 네트워크의 용량 증대를 위해서는 동시에 동일한 주파수로 데이터를 송신하는 통신 노드간의 간섭 제어가 매우 중요하다. 따라서, 최근 송수신단 다중안테나를 이용하여 간섭을 제어하는 기술들이 제안되고 있다.^[1,2] 특히, 5G 이동통신에서는 소형셀로 구성된 셀룰라 네트워크에서 다중 안테나기반으로 동작하는 단말기가 자신이 속한 기지국과 통신할 때 인접 셀로부터의 간섭과 자신이 속한 기지국으로부터의 신호를 동시에 고려하여 송수신 빔포밍을 수행할 것으로 예상된다.^[1,2] 특히, 높은 이득의 지향성이 강한 안테나를 사용하면 채널 환경이 매우 양호하게 되어 하여 별도 채널보상 회로가 필요하지 않는다.^[3] 한편, 최근 무선 네트워크에서의 간섭을 모델링하는 기법으로 확률기하 (Stochastic Geometry, SG) 이론이 개발되었다.^[4] 확률기하 이론은 간섭을 일으키는 통신 노드들과 수신기의 거리가 간섭에 미치는 영향을 통계적으로 분석하기 위하여 도입되었다. 확률 기하이론에서는 먼저 간섭을 일으키는 노드들의 위치를 포아송 프로세스 (Poisson Point Process, PPP)로 모델링하고 수신기에서 간섭 노드들로부터 도착하는 신호의 전력을 더하여 간섭의 통계적 특성을 도출한다. 최근 무선네트워크에서 송수신기가 지향성 안테나를 활용했을 때 확률기하 이론을 이용하여 무선 네트워크의 전송률 (Throughput)을 분석하는 연구가 진행되었다.^[5]

본 논문에서는 정해진 영역에 포아송 분포를 이용하여 통신 노드가 배치되고 송수신기가 지향성 안테나를 이용할 때, 발생하는 간섭의 통계적인 특성을 시뮬레이션을 통하여 분석한다. 또한, 본 논문에서는 수평된 이상적 섹터안테나 이득을 이용하여 일반적인 지향성 안테나 이득을 모델링할 수 있음을 보인다.

II. 지향성 안테나를 고려한 간섭 모델

본 장에서는 지향성 안테나를 사용하는 무선 네트워크에서의 네트워크 모델과 간섭 현상을 설명한다. 먼저, 본 논문에서 먼저 이상적인 섹터 (Ideal Sector)

* 이 연구는 국방과학연구소 (ADD)의 지원을 받았습니다.

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

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

* Agency for Defense Development (ADD), {jspark61, lhj}@add.re.kr

논문번호 : KICS2017-11-344, Received November 12, 2017; Revised November 19, 2017; Accepted November 21, 2017

안테나를 이용하여 간섭을 분석한다. 본 논문에서 고려하는 이상적인 섹터 안테나 이득 패턴은 아래와 같다.

$$G_D(\theta) = \begin{cases} g_1 = \frac{2\pi - (2\pi - \omega)g_2}{\omega} & \text{if } |\theta| \leq \frac{\omega}{2} \\ g_2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

수식 (1)에서 g_1 와 g_2 는 각각 main beam, sidelobe beam 이득을 나타내고 $\omega \in (0, 2\pi)$ 은 beamwidth를 나타낸다. 그림 1에서 보는 것처럼 원점 0에서 가장 크게 나오는 빔이 main beam이 되고, main beam 옆으로 여러 개의 작은 beam들이 sidelobe beam이 된다. 이 때 main beam의 폭이 beamwidth가 된다. 만약, $\omega = 2\pi$ 이면 비지향성 안테나로 동작한다. 수식 (1)에서 알 수 있듯이 안테나를 통해 총 방사되는 전력은 상수로 유지되며 아래 식을 만족한다.

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} G_D(\theta) d\theta = 1 \quad (2)$$

본 논문에서 고려하는 무선통신 신호의 전파모델에 따라 i 번째 송신기에서 j 번째 수신기에 도착한 신호의 전력은 다음 식과 같다.

$$P_{i,j} = P_t G_D(\theta_{x_i, y_j}) G_D(\theta_{y_j, x_i}) d_{i,j}^{-\alpha} \quad (3)$$

수식 (3)에서 P_t 는 전송 전력, $d_{i,j}$ 는 송수신기 사이의 거리, $\alpha > 2$ 는 path-loss 감쇄 상수를 나타낸다. 특히, $G_D(\theta_{x_i, y_j})$ 는 i 번째 송신기에서 j 번째 수신기로의 상대적인 위상차(θ_{x_i, y_j})에 의한 송신 안테나 이득을 나타내고 $G_D(\theta_{y_j, x_i})$ 는 i 번째 송신기에서 j 번째 수신기로의 상대적인 위상차(θ_{y_j, x_i})에 의한 수신 안테나 이득을 나타낸다. 본 논문에서 각 송신기-수신기 쌍은 동일한 거리(d)에 위치하고 안테나가 서로 정확히 정렬되어 있다고 가정한다. 따라서 각 송신기-수신기 쌍의 데이터 신호 (desired signal)의 수신 전력은 아래와 같다.

$$P_{j,j} = P_t G_D(0) G_D(0) d^{-\alpha} = P_t (g_1)^2 d^{-\alpha} \quad (4)$$

또한, j 번째 수신기에 도착하는 간섭신호는 아래와 같다.

$$I_j = \sum_{i \neq j} P_{i,j} = \sum_{i \neq j} P_t G_D(\theta_{x_i, y_j}) G_D(\theta_{y_j, x_i}) d_{i,j}^{-\alpha} \quad (5)$$

만약 성공적인 데이터 전송을 위해 요구되는 수신 신호 대 간섭 및 잡음 비 (Signal-to-Interference - and - Noise, SINR)가 β 라면 j 번째 수신기의 SINR은 다음 식을 만족해야 한다.

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

수식 (5)에서 N_0 은 수신 잡음의 전력밀도 나타내고 W 는 신호의 대역폭을 나타낸다. 본 논문에서는 송신기(x_i)가 확률기하 이론에 따라 intensity λ 를 파라미터로 갖는 Poisson Point Process (PPP)로 분포한다고 가정한다. 각 송신기와 쌍을 이루는 수신기(y_j) 들은 관련된 송신기와 d 의 거리에 위치한다고 가정한다. 충분히 넓은 영역의 네트워크를 고려하면 일반성의 훼손 없이 원점에 0번째 수신기가 존재하고 0번째 송신기는 수신기에서 d 만큼 떨어져 있으며, 다른 모든 송신기들은 2차원 평면에 PPP에 의하여 무작위적으로 존재한다고 가정할 수 있다. 따라서 주어진 네트워크 영역의 넓이가 A 일 때, 네트워크 영역에 생성되는 평균 송신 단말의 수는 λA 가 되고 발생하는 송신 단말의 개수를 랜덤 변수 n 라고 할 때 n 의 발생 확률은 아래와 같이 표현된다.

$$P(n) = \frac{A\lambda}{n!} e^{-A\lambda} \quad (7)$$

여기에서 단말의 intensity 파라미터 λ 는 1km^2 면적에서의 송신 단말의 밀도를 나타낸다.

본 논문에서는 수식 (1)에서 제시한 이상적인 섹터 안테나 이득 패턴을 일반적인 지향성 안테나 기반 네트워크에서의 간섭 분석을 위한 수학적 모형으로 사용한다. 일반적인 지향성 안테나의 이득 패턴은 매우 복잡하나 모든 지향성 안테나의 이득 패턴은 수식 (1) 식을 이용하여 상한 근사화 (Upper-bound approximation)할 수 있다. 물론 이 경우 수식 (2)의 조건은 만족되지 않는다. 그림 1은 일반적인 지향성 안테나의 이득 패턴을 수식 (1)을 이용하여 상한 근사화하는 과정을 설명한다. 그림 1과 같이 안테나 이득 패턴을 근사화하면 데이터 신호는 정확한 값을 가지나 간섭은 커지게 되어 실제 무선 네트워크의 성능은 하한 근사화 (Lower-bound approximation)된다. 그림

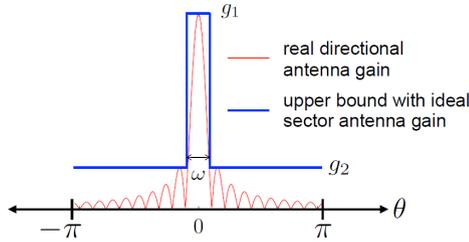


그림 1. 이상적인 섹터 안테나를 이용한 지향성 안테나 이득 근사화
 Fig. 1. Antenna gain approximation of directional antennas using ideal sector antenna gain

1에서 제시한 바와 같이 수식 (1)을 이용하여 일반적인 지향성 안테나 이득을 근사화하면 포아송 무선 네트워크에 존재하는 간섭을 효과적으로 분석할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 A 를 $30\text{km} \times 30\text{ km}$ 로 가정하고, 수신 노드가 A 영역의 가장 중심에 위치시키고 간섭 노드를 PPP분포로 밀도 λ 에 따라서 분포를 시키고 시뮬레이션은 50,000번 수행하였다. 수신 노드와 간섭 노드의 빔폭 ω 는 동일하게 두고 변화시키면서 수신 노드에 수신 간섭 신호의 측정하여 간섭 신호의 특징을 분석한다. 본 장에서 빔폭은 360° 인 무지향성 안테나를 포함하여 빔폭이 $10^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 로 설정된 지향성 안테나가 사용되었을 경우를 고려한다. 지향성 안테나의 이득은 수식 (1)의 값을 이용한다. 송수신 통신 노드들의 지향성 안테나의 방향은 무작위적으로 설정하였다. 또한 α 는 3.5로 설정하고, P_t 는 1Watt로 가정한다. 그림 2에서는 g_2 가 0.05로 주어지고 평균 단말의 수가 500과 1,000일 때, 즉, λ 가 0.55와 1.1일 때 수신 노드에 수신되는 간섭의 전력의 누적분포함수 (Cumulative Distribution Function, CDF)을 나타낸다. 무지향성 안테나가 가장 큰 간섭 신호를 받음을 알 수 있다. 지향성 안테나는 빔폭이 줄어들수록 간섭의 양이 감소함을 알 수 있다. 평균 단말의 수를 500에서 2배로 증가하면 간섭의 양 또한 전체적으로 증가한 것을 관찰할 수 있다. 그림 3에서는 λ 가 0.55로 주어질 때 g_2 의 변화에 따른 수신 노드에 수신되는 간섭의 전력의 누적분포 함수를 나타낸다. g_2 가 증가하면 sidelobe의 이득이 증가해서 간섭 신호의 전체적인 값이 커지기 때문에 수신 노드에 수신되는 간섭 신호가 증가하게 됨을 알 수가 있다. 또한, 빔폭이 증

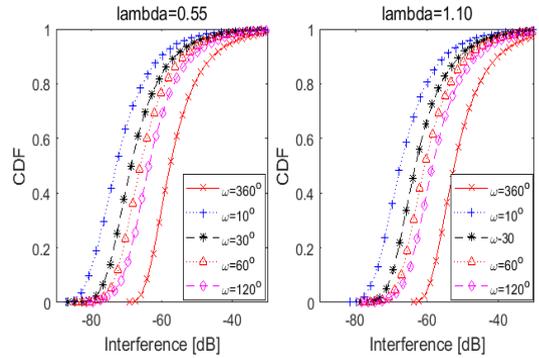


그림 2. λ 의 변화에 따른 간섭신호의 누적 분포 함수 ($g_2=0.05$)
 Fig. 2. CDF of interference for varying λ at $g_2=0.05$

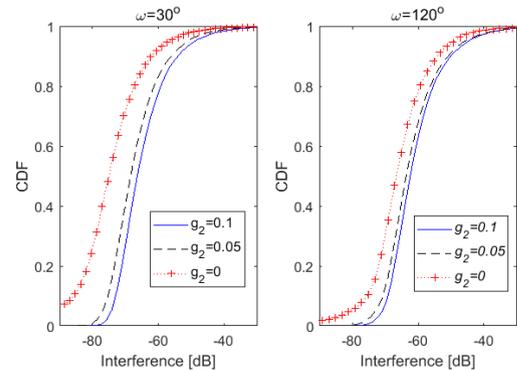


그림 3. g_2 의 변화에 따른 간섭신호의 누적 분포 함수 ($\lambda=0.55$)
 Fig. 3. CDF of interference for varying g_2 at $\lambda=0.55$

가하면 $g_2=0.1$ 일 때의 누적분포함수가 $g_2=0$ 일 때의 누적분포함수로 근접하게 됨을 알 수도 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 지향성 안테나를 활용하는 무선 네트워크에서 간섭을 분석하는 방법론을 제시한다. 일반적인 지향성 안테나의 송수신 이득은 본 논문에서 고려한 이상적인 섹터안테나 이득을 이용하여 상한 근사화할 수 있음도 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통하여 빔폭이 줄어들면 간섭의 양이 전반적으로 줄어들음을 확인할 수 있으며 통신 노드의 밀도가 증가하면 간섭의 양은 더욱 급격히 증가함도 확인하였다. 향후 일반적인 지향성 안테나의 이득값을 정확히 모델링하였을 때와 본 논문에서 제시한 상한 근사화한 간섭의 통계적인 특성이 비교 분석할 예정이다.

References

- [1] B. C. Jung and W. -Y. Shin, "Opportunistic interference alignment for interference-limited cellular TDD uplink," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 148-150, Feb. 2011.
- [2] H. J. Yang, W.-Y. Shin, B. C. Jung, C. Suh, and A. Paulraj, "Opportunities downlink interference alignment for multi-cell MIMO networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1533-1548, Mar. 2017.
- [3] Y. J. Ryu and J. M. Ahn, "Research on performance analysis for the long distance air-ground wideband common data link," *J. KICS*, vol. 42, no. 04, pp. 701-715, 2017.
- [4] H. ElSawy and M. Haenggi, "Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 3, pp. 996-1019, third quarter, 2013.
- [5] 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. Wirel. Commun.*, vol. 13, no. 12, pp. 7072-7085, Dec. 2014.