

## 곡선 적합 기반 밀리미터파 및 테라헤르츠 다중빔 성능 근사화

김조은, 권태수

서울과학기술대학교

worth3910@naver.com, tskwon@seoultech.ac.kr

## Curve-Fitting Based Performance Approximation for mmWave and Teraherz Multibeam Networks

Joeun Kim, Taesoo Kwon

Seoul National Univ. of Science &amp; Technology

## 요약

5G와 6G에서는 더 넓은 대역폭을 가지고 더 높은 속도로 데이터를 제공하여 많은 데이터의 양을 서비스할 수 있다. 여기에 다중빔을 활용하여 동시에 여러 단말들에게 방대한 데이터를 송신하는 것이 가능하기에 이에 관한 여러 연구가 진행되고 있다. 이 중 확률 기하나 시스템 레벨 시뮬레이션을 기반으로 한 성능 분석은 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역이나 다중빔처럼 복잡한 네트워크 환경일 때에는 용이하지 않다. 따라서 본 논문에서는 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역에서의 다중빔 성능을 다항 로지스틱 함수(Polynomial Logistic Function)를 기반으로 한 Curve-Fitting을 활용해 근사화가 가능함을 보인다.

## I. 서론

5G는 6GHz 이하 대역뿐만 아니라 28GHz, 6G에서는 300GHz와 같은 넓은 대역폭을 활용하면서 더 높은 속도로 데이터를 제공할 수 있게 되었다. 더 나아가 기지국은 다중빔을 활용하여 많은 데이터의 양을 여러 단말들에게 동시에 제공할 수 있다. 따라서 이에 대한 여러 연구가 이루어지고 있다. 하지만 밀리미터파는 방해를 영향과 빔포밍으로 테라헤르츠는 분자 흡수에 민감한 특성으로 인해 복잡한 채널 환경을 가지며 다중빔은 송신하는 빔의 개수가 많아질수록 간섭이 증가하고 셀 안의 간섭도 고려해야 해 분석하기가 어렵다.

[1],[2]는 각각 밀리미터파, 테라헤르츠 대역 네트워크에서 확률 기하 및 시스템 레벨 시뮬레이션을 기반으로 성능을 분석하였고, [3] 또한 joint transmission을 하는 테라헤르츠 환경에서 그 성능을 분석했다. 하지만 위의 논문들에서 다중빔을 활용하는 다중셀 환경에서의 분석은 이루어지지 않았고 밀리미터파 및 테라헤르츠를 비교하여 분석하지는 않았다. 또한 사용한 성능 분석 방법은 수학적 복잡하여 분석이 어렵고 시뮬레이션에 시간이 많이 소요되므로 복잡한 채널 환경에 용이하지 않다. [4]-[5]는 그러한 단점을 극복하기 위하여 기계학습을 기반으로 한 성능 분석 결과를 보여주었지만 분석을 진행한 네트워크 환경이 6GHz 이하 및 밀리미터파 대역으로 다소 제한적이다.

본 논문에서는 [4]-[5]의 연구를 기반으로 확장하여 다중빔을 활용하는 밀리미터파 및 테라헤르츠 다중셀 네트워크에서의 성능을 다항 로지스틱 함수(Polynomial Logistic Function)를 기반으로 한 Curve-Fitting으로 근사화할 수 있음을 보이고자 한다.

## II. 시스템 모델

기지국과 단말은 균일 프아송 점 과정(Poisson Point Process, PPP)에 따라 분포하고 기지국은 하나 이상의 단말들에게 서비스한다. 채널 환경은 LoS(Line of Sight)와 NLoS(Non Line of Sight)으로 구분되며 지수의 방해물 모델에 따라  $e^{-\mu R}$ 의 확률로 채널환경은 LoS가 된다. 이때  $\mu$ 는 방해물 밀도를,  $R$ 은 기지국과 단말 사이의 거리이다. 특히 테라헤르츠 환

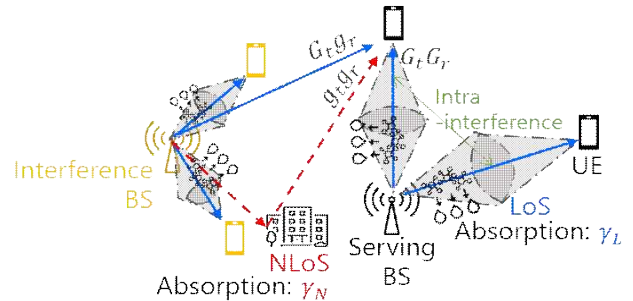


그림 1. 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역 다중빔 네트워크 모델

경에서는 밀리미터파와 구분되는 특징으로 대기 중의 수분에 의한 분자 흡수로 인한 손실이 잘 나타나고 이를 반영하는 흡수 계수를 가진다. 흡수 계수는 반송 주파수와 채널 환경이 LoS인지 NLoS인지에 따라 달라진다. 이에 따라 경로감쇄이득을  $K$ , LoS, NLoS에 따른 경로감쇄지수를  $\alpha_L$ ,  $\alpha_N$ , 흡수 계수를  $\gamma_L$ ,  $\gamma_N$ 라고 할 때, 경로감쇄는 아래 식과 같다.

$$L(R) = \begin{cases} KR^{-\alpha_L}e^{-\gamma_L R} & \text{if link is LoS} \\ KR^{-\alpha_N}e^{-\gamma_N R} & \text{if link is NLoS} \end{cases} \quad (1)$$

안테나 이득은 섹터화된 안테나 모델을 사용하여 근사화되며 메인 로브 이득  $G$ 은 사이드 로브 이득 대 메인 로브 이득 비율이  $\xi$ , 빔 폭이  $\theta$ , 최대 빔 개수가  $k$ 일 때 아래 식과 같이 나타낼 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$G = 10 \log_{10} \left( \frac{2}{k(1 - \cos(\frac{\theta}{2})) + \xi(k \cos(\frac{\theta}{2}) - (k-2))} \right) \quad (2)$$

송수신빔이 아래첨자  $t$ 와  $r$ 로 구분될 때, 단말은 기지국과의 경로감쇄가 가장 작은 것과 연결되며 안테나 이득은  $G_t G_r$ 가 된다. 간섭 기지국과는 각각의 빔 폭에 따른 확률에 의해서 얻는다. 또한 다중빔을 활용함으로써 생기는 셀 안에서의 간섭에 대한 안테나 이득은 기지국을 중심으로 셀 안

의 다른 단말들 각각에 대해 각도 차이가  $\frac{\theta_l}{2}$  보다 작으면  $G_l G_r$ , 크면  $g_l G_r$ 가 된다. 따라서 레일레이 페이딩으로 인한 페이딩 이득이  $h$ , 송신 전력  $P$ , 송신하는 빔의 개수가  $m$ , 잡음 전력이  $\sigma^2$ 일 때 SINR은  $\frac{\frac{P}{m} L(R) G_l G_r h}{\sigma^2 + I}$  이다. 여기서  $I$ 는 셀 간과 안에서의 간섭 신호를 합한 값이다. 이러한 다중빔을 활용한 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역에서의 네트워크 모델은 그림 1에 나타나고 있다.

본 논문에서는 다항 로지스틱 함수에 기반한 비선형 최소자승법 (Non-linear Least Square)의 Curve-Fitting으로 위와 같은 네트워크에서의 성능을 근사화 하는 것을 제안하고자 한다. 다항 로지스틱 함수는 매개변수가  $\nu \triangleq (\nu_0, \dots, \nu_n)$ 일 때 아래 식과 같이 나타낸다.

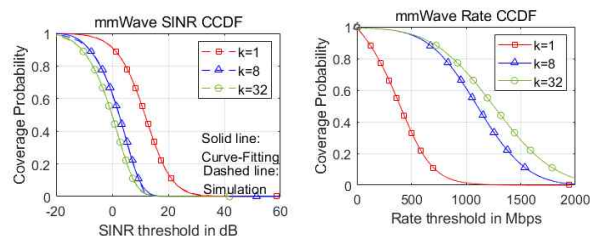
$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\nu_n x^n - \dots - \nu_1 x - \nu_0)} \quad (3)$$

### III. 성능 근사화

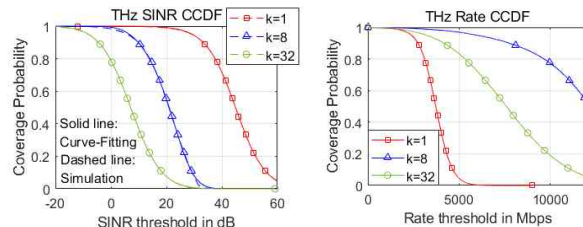
표 1. 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역 다중빔 네트워크 환경변수

환경 변수	밀리미터파 값	테라헤르츠 값
$f_c$ : 반송주파수, 대역폭	28 GHz, 100 MHz	300 GHz, 250 MHz
$\xi$ : 사이드 로브 이득 대 메인 로브 이득 비율	0.01	0.0001
$\theta_t, \theta_r$ : 송수신빔 폭	10, 360 degrees	3.17, 25.3 degrees
$\gamma_L, \gamma_N$ : 흡수계수	0, 0	0.005, 0.005
$\lambda$ : 기지국 밀도	$1/(10^2 \pi) m^{-2}$	$1/(50^2 \pi) m^{-2}$
$1/\mu$ : 1/방해물 밀도	141.4 m	
$P$ : 송신전력	30 dBm	
$K$ : 경로감쇄이득	$(\frac{c}{4\pi f_c})^2, c$ : 진공에서의 빛 속도	
$\alpha_L, \alpha_N$ : 경로감쇄지수	2, 4	
$N_0 W$ : 잡음 전력	$-174 \text{ dBm/Hz} + 10 \log_{10} W + 10$	

시뮬레이션은 표 1의 환경 변수 값들<sup>[1],[3]</sup>을 기반으로 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역 다중빔 네트워크에서 진행되었는데 그림 2의 (a)와 (c)는 단말별 SINR 확률 분포로 최대 빔 개수가 많아질수록 송신 전력이 낮아져 SINR이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 2의 (b)와 (d)는 셀별 데이터 전송률 확률 분포이며 이를 통해 최대 빔의 개수가 많아질수록 서비스하는 단말이 늘어나 전송률이 올라가는 것을 볼 수 있는데, 특히 (d)에서와 같이 최대 빔 개수가 특정 개수를 넘어가면 간섭으로 인해 오히려 전송률이 낮아지게 된다. 그리고 SINR 확률분포를 3차 다항 로지스틱 함수로 Curve-Fitting하였는데, 그림 2의 (a)와 (c)를 보면 그 결과가 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 사용한 다항 로지스틱 함수의 차수는 RMSE(Root Mean Square Error)를 비교하여 결정하였고 그 값은  $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$ 로 계산된다. 이 때,  $n$ 은 전체 시뮬레이션 데이터의 개수,  $y_i$ 는 시뮬레이션 데이터 값,  $\hat{y}_i$ 은 Curve-Fitting 값이다. 최대 빔 개수가 8개인 시나리오에서 그림 2의 (a)의 경우 RMSE가 다항 로지스틱 함수의 차수가 2차일 때  $1 \times 10^{-2}$ 이지만 3차일 때  $5 \times 10^{-3}$ 로 낮아지고 4차일 때는 유의미한 감소가 나타나지는 않는다. 그림 2의 (c)도 마찬가지로 2차일 때  $1 \times 10^{-2}$ 이고 3차일 때  $6 \times 10^{-3}$ 으로 낮아지지만



(a) 밀리미터파 SINR 확률 분포 (b) 밀리미터파 전송률 확률 분포



(c) 테라헤르츠 SINR 확률 분포 (d) 테라헤르츠 전송률 확률 분포

그림 2. 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역 다중빔 성능 그래프

4차일 때는 유의미한 감소가 나타나지 않는다. 따라서 3차 다항 로지스틱 함수로 밀리미터파 및 테라헤르츠 SINR 확률 분포를 Curve-Fitting하였고 RMSE 값이  $5 \times 10^{-3}$  수준으로 근사화가 가능함을 확인할 수 있다.

### IV. 결론

본 논문에서는 다중빔을 활용하는 밀리미터파 및 테라헤르츠 다중셀 네트워크에서의 성능을 다항 로지스틱 함수를 기반으로 Curve-Fitting하여 근사화 할 수 있음을 확인했고, 이를 통해 성능 매개변수화가 가능하였다. 향후에는 다양한 환경 변수 값에 따라 달라지는 여러 SINR 확률 분포를 빠르게 도출하고 기지국 밀도 등 중요한 네트워크 환경 변수들에 따른 영향을 간단하게 분석하기 위해 기계학습을 적용하는 연구로 확장해나가고자 한다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1F1A1072239).

### 참고 문헌

- [1] T. Bai, R. W. Heath, "Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 14, no. 2, pp. 11100-11114, Feb. 2015.
- [2] K. Humadi, I. Trigui, W. P. Zhu and W. Ajib, "Coverage Analysis of User-Centric Dense Terahertz Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 9, pp. 2864-2868, Sep. 2021.
- [3] N. R. Olson, J. G. Andrews and R. W. Heath, "Coverage and Capacity of Terahertz Cellular Networks With Joint Transmission," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 11, pp. 9865-9878, Nov. 2022.
- [4] H. K. Park, J. Um, S. Park and T. Kwon, "Downlink performance approximation of cellular networks via stochastic geometry and machine learning," *Journal of KICS*, vol. 45, no. 3, pp. 492-495, Mar. 2020.
- [5] J. Kim and T. Kwon, "Machine Learning Based Performance Approximation for Millimeter-Wave Cellular Networks," *Journal of KICS*, vol. 47, no. 2, pp. 228-231, Feb. 2022.