

저자 (Authors)	윤현식, 이미현, 손하영, 최계원 Hyun Sik Yoon, Mi Hyun Lee, Ha Young Son, Kae Won Choi
출처 (Source)	<a href="#">한국통신학회 학술대회논문집</a> , 2020.11, 146-147 (2 pages) <a href="#">Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences</a> , 2020.11, 146-147 (2 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국통신학회</a> Korea Institute Of Communication Sciences
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10501136">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10501136</a>
APA Style	윤현식, 이미현, 손하영, 최계원 (2020). 초고밀도 무선 네트워크 성능 평가를 위한 레이트레이싱 시뮬레이터. 한국통신학회 학술대회논문집, 146-147.
이용정보 (Accessed)	성균관대학교 자연과학캠퍼스 115.***.155.164 2021/01/20 11:50 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# 초고밀도 무선 네트워크 성능 평가를 위한 레이트레이싱 시뮬레이터

윤현식, 이미현, 손하영, 최계원  
성균관대학교

a42000@skku.edu, curinglee@gmail.com, gds04070@gmail.com, kaewonchoi@skku.edu

## Raytracing simulator for Testing Ultra Density Wireless Network

Hyun Sik Yoon, Mi Hyun Lee, Ha Young Son, Kae Won Choi  
SungKyunKwan Univ.

### 요 약

본 논문에서는 복잡한 통신환경에서 초고밀도 무선 네트워크 성능을 가상적으로 평가할 수 있는 레이 트레이싱 시뮬레이터를 제작하였다. 시뮬레이터를 이용하여 어떠한 가상적인 통신환경을 구현한 후, 송신단에서 출발하여 수신단에 도달하는 ray 를 추출해 ray list 을 만든 후 그림으로 나타내 보았고 나아가 multipath 를 시간 도메인과 주파수 도메인을 사용하여 나타냈다.

### I. 서 론

최근 높은 데이터 전송률을 달성하기 위해, 5G 초고밀도 무선 통신 시스템의 개발과 평가에서 중요한 것 중 하나가 시험과 검증이다. 따라서, 무선 시스템은 명시한 요건을 충족하는지 확인하기 위해 현장 시험을 거쳐야 한다. 그러나 현장 시험은 비용이 많이 들고, 시간이 많이 걸리며, 반복하기 어렵다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 레이트레이싱 기법으로 가상적인 고밀도의 복잡한 통신환경을 구현하여 무선 네트워크의 성능평가를 할 수 있다.

### II. 본론

레이트레이싱 시뮬레이터를 본 논문에서는 Python 언어를 사용하여 구현하였다. 먼저 송신단에서 전파(이후 ray 로 설명한다)를 쏘았을 때 수신단이 받는 ray list 구하는 알고리즘부터 설명한다.

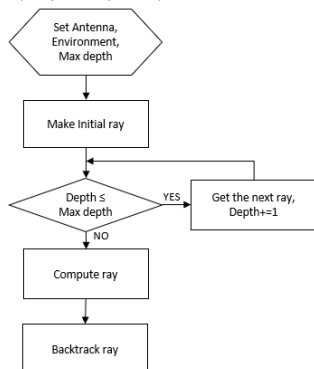


그림 1. 레이 목록 산출 알고리즘

우선 실험환경의 벽의 위치와 두께, 안테나의 위치와 방향을 설정하여 실험 환경을 구현하고, Max depth 를 설정해 준다. 이 때의 Max depth 는 송신 안테나에서 발사한 ray 가 진행중에 만나는 장애물의 최대 개수를 의미한다.

그 후, 송신 안테나에서 geodesic grid 을 사용하여 가정된 raytube angle 에 맞게 최대한 겹치지 않으면서 안테나의 gain 을 고려하여 initial ray 를 만들고, 형성된 initial ray 가 장애물과의 만나는지 Möller-Trumbore intersection algorithm 알고리즘 활용하여 알아본다. 알고리즘은 다음과 같다.

```

(평행사변형 벽의 모서리의 좌표 v0, v1, v2, v3)
-->= v1 - v0
v0v1
-->= v2 - v0
v0v2
-->= dir x v0v2 (Ray 의 방향벡터: dir)
pvec dir v0v2
det = --> · -->, invdet = 1/det
-->= orig - v0, -->= --> x -->
tvec qvec tvec v0v1
v = 1/invdet ( --> · --> ), u = 1/invdet ( --> · --> ), t = 1/invdet ( --> · --> )
cond = (0 ≤ u ≤ 1) & (0 ≤ v ≤ 1) & (0 ≤ t)
if cond == true return true, else return false
  
```

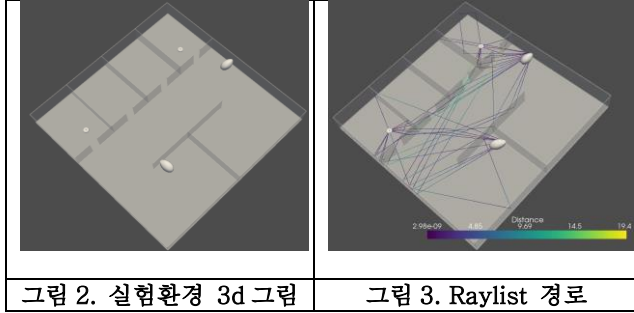
장애물과 만나게 되면 depth 를 1 올려주고 반사 및 굴절된 다음 ray 의 정보를 가져온다. ray 는 다음과 같은 정보를 저장한다.

- 1) ray 의 출발지점
- 2) ray 의 방향
- 3) ray 의 raytube angle
- 4) ray 가 출발한 object(송신안테나 혹은 장애물)
- 5) ray 가 충돌한 object(수신안테나 혹은 장애물)
- 6) ray 가 출발해서 도착할 때까지의 길이
- 7) 현재 ray 의 depth

그 다음 각각 ray 마다 시작점과 수신안테나를 잇는 선과 ray 중심선 사이의 각도(θ<sub>1</sub>)와 raytube angle 의 크기(θ<sub>2</sub>)를 비교한다. θ<sub>2</sub> ≥ θ<sub>1</sub> 일 때 수신안테나는 해당 ray 를 온전하게 수신한다고 가정하였다. 이러한 방법으로 어떤 한 depth 의 ray 를 수신안테나가 수신할 수 있는지 계산하는 compute ray 함수를 실시한다. 해당

과정 이후 마지막으로 송신안테나에서 발사한 ray 가 최종적으로 수신단에서 수신 가능한 ray 들만 골라내서 raylist 를 만드는 backtrack ray 과정을 실시한다.

지금까지 설명한 알고리즘을 활용하여 산출해낸 raylist 를 pyvista 모듈을 활용해서 그림으로 나타내 보았다. 그림 1 은 설정된 실험환경을 나타낸 3d 그림이고 2 개의 패치 안테나가 송신을 하고, 2 개의 dipole 안테나가 수신을 한다고 가정하였다. 그림 2 는 위의 알고리즘을 이용해서 계산된 raylist 의 경로를 나타낸 3d 그림이다.



다음으로 ray 가 진행하면서 장애물과 이동경로로 인한 감쇄 및 위상 변화와 경로의 길이에 따라 tap delay 를 구하였다.

기본적으로 ray 가 진행하면서 이동경로에 따라 감쇄 및 위상변화가 발생한다. 이동경로는 진공으로 가정했으며, ray 의 송신단에서 수신단까지의 거리 r 에 해당하는 감쇄 및 위상변화는 다음과 같다.

진공공간에서의 이동 경로에 따른 감쇄 및 위상 변화:

$$E_{end} = \frac{1}{4\pi Rf} e^{-ikr} E_{start}$$

그림 4 와 같이 벽에서 반사가 일어났을 경우에는 정반사가 된다고 가정을 하였다. 그리고 벽의 반사에 의한 감쇄와 위상변화의 경우  $r_{TE}$  와  $r_{TM}$  의 값만 고려를 해주면 된다. 반면 그림 5 와 같이 벽에서의 굴절의

벽 콘크리트 내부에서의 굴절 각:  $\theta_t = a \sin\left(\frac{n_i}{n_t} \sin\theta_i\right)$

TE 의 경우에서의 반사 및 굴절로 인한 감쇄 및 위상 변화:

$$r_{TE} = \frac{\begin{pmatrix} \vec{E}_{or} \\ \vec{E}_{oi} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \vec{E}_{or} \\ \vec{E}_{oi} \end{pmatrix}} = \frac{n_i \cos(\theta_i) - n_t \cos(\theta_t)}{n_i \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

$$t_{TE} = \frac{\begin{pmatrix} \vec{E}_{ot} \\ \vec{E}_{oi} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \vec{E}_{or} \\ \vec{E}_{oi} \end{pmatrix}} = \frac{2n_i \cos(\theta_i)}{n_i \cos(\theta_i) + n_t \cos(\theta_t)} = \frac{2 \cos(\theta_i) \sin(\theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$$

TM 의 경우에서의 반사 및 굴절로 인한 감쇄 및 위상 변화:

$$r_{TM} = \frac{\begin{pmatrix} \vec{E}_{or} \\ \vec{E}_{oi} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \vec{E}_{or} \\ \vec{E}_{oi} \end{pmatrix}} = \frac{n_t \cos(\theta_i) - n_i \cos(\theta_t)}{n_i \cos(\theta_t) + n_t \cos(\theta_i)} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}$$

$$t_{TM} = \frac{\begin{pmatrix} \vec{E}_{ot} \\ \vec{E}_{oi} \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \vec{E}_{or} \\ \vec{E}_{oi} \end{pmatrix}} = \frac{2n_i \cos(\theta_i)}{n_i \cos(\theta_t) + n_t \cos(\theta_i)} = \frac{2 \cos(\theta_i) \sin(\theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)}$$

진공공간에서의 이동 경로에 따른 감쇄 및 위상 변화:

$$E_{end} = \frac{1}{4\pi Rf} e^{-ikr} E_{start}$$

콘크리트내에서의 이동 경로에 따른 감쇄 및 위상 변화:

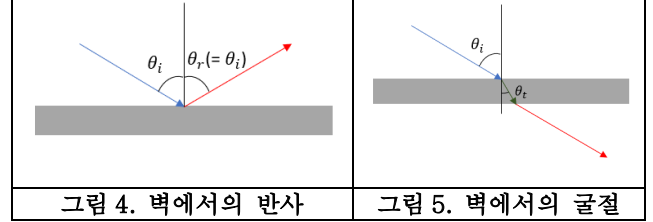
$$E_{end} = e^{-\alpha r} e^{-i\beta r} E_{start}$$

$$\alpha = \omega \left[ \frac{\mu \epsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}} (Np/m)$$

$$\beta = \omega \left[ \frac{\mu \epsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}} (rad/m)$$

$\epsilon'_r = 5.539, \epsilon''_r = 0.06(5.8GHz \text{에서 콘크리트 유전율})$   
 $n_{con} = \sqrt{\epsilon} \quad \epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$

경우에는  $t_{TE}$  와  $t_{TM}$  값과 콘크리트내에서의 이동경로(r)에 따른 감쇄 및 위상변화를 고려를 해주어야 한다.



Multipath 의 최종 계산 결과를 특정 주파수로 고정하고 ray 경로의 길이를 시간으로 표현하는 시간 도메인과 주파수의 변화를 고려한 주파수 도메인 두가지의 방법으로 나타내는 것이 가능하다. 그림 6 은 5.8 GHz 로 고정하고 Time 도메인의 방식으로 multipath 를 구하였고, 그림 7 은 5.65~5.95GHz 대역을 주파수 도메인의 방식으로 구한후에 IFFT 를 취해 시간대역으로 나타낸 것이다. 비교해보면 두 경우가 상당히 유사함을 볼 수 있다.

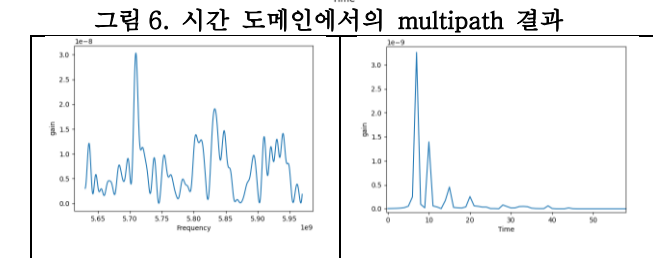
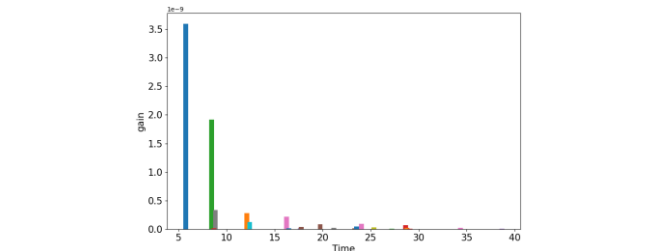


그림 6. 시간 도메인에서의 multipath 결과  
 그림 7. 주파수 도메인에서의 multipath 결과

그림 8. IFFT 후 시간 도메인으로 나타낸 결과

III. 결론

본 논문에서는 복잡한 통신환경에서 초고밀도 무선 네트워크 성능을 가상적으로 평가할 수 있는 레이 트레이싱 시뮬레이터를 제작하였다. 시뮬레이터를 이용하여 특정한 통신환경을 가상적으로 구현한 후, 송신단에서 수신단까지 가는 ray 를 추출해 그림으로 나타내 보았고 나아가 multipath 의 tap delay 와 감쇄와 위상 변화로 인한 최종 gain 값을 2 가지 방법으로 구하였다. 이번 연구를 통해 다양한 통신환경에서의 무선 네트워크 성능을 쉽고 간편하게 평가 및 검증할 수 있기를 기대한다.

참 고 문 헌

[1] G. Durgin, N. Patwari and T. S. Rappaport, "An advanced 3D ray launching method for wireless propagation prediction," 1997 IEEE 47th Vehicular Technology Conference.

[2] Möller, Tomas & Trumbore, Ben. (2005). Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection. Journal of Graphics Tools. 2. 10.1145/1198555.1198746.

[3] Purcell, E. M., & Morin, D. J. (2013). Electricity and Magnetism

[4] Hecht, Eugene, Optics, 2nd Ed, Addison Wesley, 1987