

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.4.53>

IIBC 2016-4-9

밀리미터파 대역의 실내 채널 모델링 분석

Analysis of Indoor Channel Modeling in Millimeter-Wave Band

이원희*, 표성민**

Won-Hui Lee*, Seongmin Pyo**

요약 밀리미터파 실내 무선통신시스템을 위한 전파 채널 특성의 분석을 위하여 광선 추적 기법을 제안하였다. 반사파는 밀리미터파의 초단파 특성상 거친 표면의 매질을 포함하여 분석하였고, 투과파는 유전체 매질을 통과한 경우를 고려하였다. 밀리미터파 대역에서의 전송되어 수신된 전력 레벨의 지도와 사각형 방안의 송신기로부터의 RMS 지연확산분포 결과를 나타내었다. 바닥면의 표면 거칠기 인자는 0과 0.13으로 가정하여 수신 파워 레벨을 빈방에서 나타내었다. 시뮬레이션 결과 반사계수를 이용한 푸리스 방정식의 계산은 매우 잘 일치하였다. 시뮬레이션은 어떠한 가구 형태의 크기를 방의 어떠한 곳에 위치 시켜도 계산이 가능하다.

Abstract A ray tracing method to analyze the propagation channel characteristics for a millimeter-wave indoor wireless communication system is presented. Reflected rays from planar as well as rough surfaces are included. Transmitted rays through a thin dielectric slab are considered. Maps representing received power levels and RMS delay spread from a transmitter in a rectangular room are shown. The received power levels in the empty room for bottom's roughness factors of 0 and 0.13 are represented. The simulation results are well consistent with the calculation of Friis equation with reflection coefficient. Any size of furniture the shape of plane form can be positioned anywhere in the room.

Key Words : ray tracing, millimeter-wave, power level, RMS delay spread

1. 서론

근래의 무선통신시스템은 실내 환경의 수요가 급격히 증가되고 있고, 더 빠른 전송률이 요구되고 있다. 지난 20년간의 발전상을 보아올 때 향후 10~15년 사이에는 10 Gbps 이상의 전송율이 필요할 것으로 보인다^{[1],[2]}. 기존의 60 GHz 대역의 밀리미터파^[3] 실내 무선통신의 대역폭으로는 3 Gbps 이상의 전송률을 얻기가 불가능하다^[4]. 더

빠른 전송률을 얻기 위해서는 더 높은 캐리어 주파수의 선택이 불가피하다. 따라서 앞으로의 실내 무선통신시스템은 100 GHz 이상의 밀리미터파를 이용하게 될 것으로 예상된다.

100 GHz 이하의 밀리미터파 통신은 이미 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있고 많은 성과가 이루어졌지만, 100 GHz 이상의 밀리미터파 통신은 연구 진행 중에 있다. 이러한 상황에서 100 GHz 이상의 밀리미터파 주파

*정회원, 서일대학교 정보통신과

**정회원, 한밭대학교 정보통신공학과(교신저자)

접수일자 : 2016년 6월 8일, 수정완료 : 2016년 7월 8일

게재확정일자 : 2016년 8월 5일

Received: 8 June, 2016 / Revised: 8 July, 2016 /

Accepted: 5 August, 2016

**Corresponding Author: spyo@hanbat.ac.kr

Dept. of Information and Communication Engineering, Hanbat National University, Korea

수에 대한 우리나라의 기술 선점 연구는 매우 중요하다.

100 GHz 이상의 밀리미터파의 풍부한 주파수 대역을 활용하기 위해서는 안테나의 지향성, 전파 특성, 통신 환경 등 다양한 파라미터에 대한 최적화 시뮬레이션이 필요하다. 100 GHz 이상의 밀리미터파 대역에서의 시스템은 고주파 반도체 소자 기술의 발전과 나노 공정에 의한 미세 가공 기술의 발달로 구체적인 시스템 구현이 충분히 가능하다. 따라서 테스트 베드 구축에 필요한 안테나의 복사 특성 파라미터 설정, LOS (Line Of Sight) 라우팅 (routing) 방법, 링크 버짓(link budget) 산출 등에 관한 종합적인 통신망 구축 연구는 매우 중요하다고 판단된다^{[5]~[7]}. 따라서 본 논문에서는 실내 무선통신의 전파 채널 특성 파악의 초석이 되는 광선 추적 (ray tracing) 기반^{[8],[9]}의 밀리미터파 시뮬레이터 제작을 목표로 하였다. 이 시뮬레이터를 통해 실내 환경에서 방의 크기, 송신기의 위치, 가구의 배치 등에 따른 실내 공간에서의 전력 전송 특성을 파악할 수 있다. 100 GHz 이상의 밀리미터파 대역에서는 직진성이 매우 강하기 때문에 회절에 의한 영향을 무시하였고, LOS 및 반사에 의한 영향만을 고려하였다. 또한 파장이 매우 짧기 때문에 벽 표면의 거친 정도가 스넬의 법칙에 따라서 반사가 일어나지 않고, 다른 방향으로의 산란이 일어나게 된다. 이것은 스넬의 법칙에 따른 반사 방향에서 보았을 때 반사계수가 줄어드는 것과 같은 효과가 나타난다. 이를 고려하여 벽면의 거친 정도에 따라 변하는 반사계수를 시뮬레이터에 포함하였다.

II. 시뮬레이션 조건

방의 크기는 6×5×2.5 m에서 안테나 빔폭은 70°로 산정하였고 전파 환경은 가시영역 (LOS)을 가정하였다. 편파는 TE 편파, 건물 외벽의 유전율은 6.50-j0.43, 가구의 유전율은 1.59-j0.01, 벽면의 거칠기는 0.13 mm, 송신 파워는 -13.9 dBm, 송신기 위치는 방의 중앙 및 천정으로부터 0.2 m 아래, 수신 포인트는 바닥으로부터 0.3 m 높이에 가로, 세로 1 m 당 15개를 배치하였다. 수신 포인트가 많을수록 더 정확한 결과를 얻을 수 있지만, 그만큼 레이 (ray)의 개수를 늘려야 하므로 시뮬레이션 시간이 길어진다. 시뮬레이션 결과로는 각각의 수신 포인트에서의 수신 레벨과 RMS 지연확산분포를 얻을 수 있다. 수신 포인트에서 다중 경로에 의한 전력 합계가 없는 경우에는 RMS 지연확산분포가 항상 0이 되기 때문에 결과에

나타내지 않았다.

III. TE 및 TM 편파 특성

평면파가 자유공간으로부터 비유전율이 6.50인 벽면을 향하여 TE 및 TM 편파(polarization)가 입사하는 경우에 대해 입사각이 0에서 90도까지 변할 때의 반사계수를 도시화하면 그림 1과 같다.

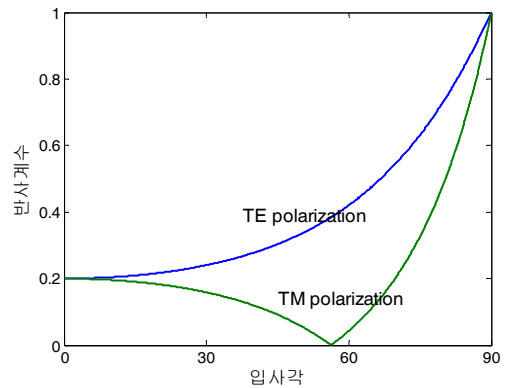


그림 1. TE 및 TM 편파 특성

Fig. 1. Characteristics of TE and TM polarization

위의 그래프에서 알 수 있듯이 TE 편파 일 때의 반사계수가 모든 각도에서 TM 편파 일 때에 비해 더 크거나 같음을 알 수 있다. 방 내부에서의 시뮬레이션에서 투과보다는 반사에 의해 수신 포인트로 신호가 전달되는 경우가 지배적이기 때문에 TE 편파를 이용하는 것이 통신에 더 유리할 것이다.

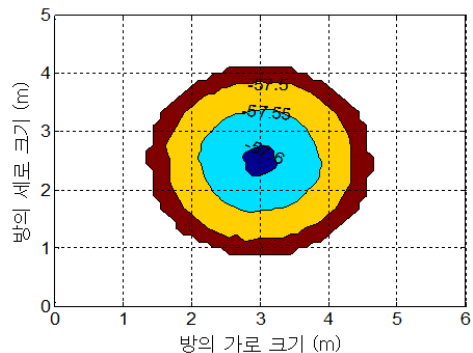


그림 2. TE편파 특성

Fig. 2. Characteristics of TE polarization

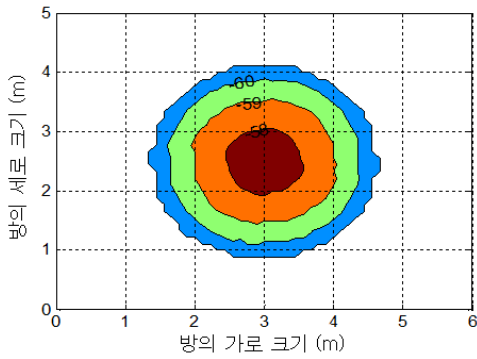


그림 3. TM 편파 특성
 Fig. 3. Characteristics of TM polarization

TE 또는 TM 편파일 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 방의 크기는 6×5×2.5 m이고, Tx의 위치는 (3, 2.5, 2.5) m, Rx 높이는 0.3 m, 바닥의 비유전율은 3으로 두었다. 시뮬레이션 결과는 direct LOS에 의한 파워 (power)는 배제하고 바닥에 한 번 반사된 파에 의한 파워만을 계산한 것이다. 그림 1에서의 결과와 같이 TE 편파의 경우가 반사에 의한 파워의 전달이 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

IV. 표면이 거친 경우의 반사계수

표면이 거친 경우의 반사계수는 아래의 식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_{TE}' = \rho \cdot \Gamma_{TE} \quad (1)$$

$$\Gamma_{TM}' = \rho \cdot \Gamma_{TM} \quad (2)$$

편파에 관계없이 유효 반사 계수 (effective reflection index) ρ 만큼 반사계수가 줄어들고 ρ 는 레이 (ray)의 입사 각도와 주파수, 표면의 거친 정도 σ 의 함수로 식 (3)으로 나타낸다.

$$\rho = e^{-\frac{g}{2}} \quad (3)$$

여기서, $g = \left(\frac{4\pi \cdot \sigma \cdot \cos\theta_i}{\lambda} \right)^2$ 이다.

표면이 거칠수록, 입사각도가 90° 에 가까워질수록 반

사계수는 더 작아짐을 알 수 있고, 파장이 클수록 거친 정도를 작게 느끼는 것을 알 수 있다.

그림 4에는 TE 편파에서 유효 반사계수 ρ ($\sigma=0.13$ mm)를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우에 대해 입사각에 대한 반사계수를 나타내었다. 레이가 장애물에 수직에 가깝게 입사할수록 반사계수에 더 큰 영향을 받음을 그림에서 확인할 수 있다.

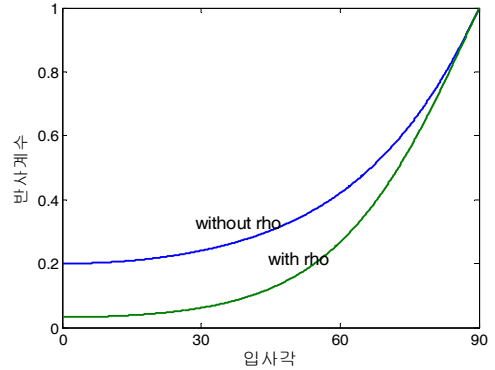


그림 4. 유효 반사 계수의 영향
 Fig. 4. Effect of effective reflection index

유효 반사 계수가 0 인 경우를 그림 5에 나타내었고, 유효 반사 계수가 0.13인 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다. 방의 크기는 6×5×2.5 m 이고, Tx의 위치는 (3, 2.5, 2.5) m, Rx 높이는 0.3 m, phi는 0~360°, theta는 150~180°, 바닥은 PEC로 가정하여 100 % 반사가 일어나는 상황으로 설정하였다. 아래의 결과는 direct LOS에 의한 파워는 배제하고 바닥에 한 번 반사된 파에 의한 파워만을 계산한 것이다. 바닥을 거칠게 설정한 경우 반사계수의 감소로 인해 평평한 바닥인 경우보다 파워가 작게 나옴을 확인할 수 있다.

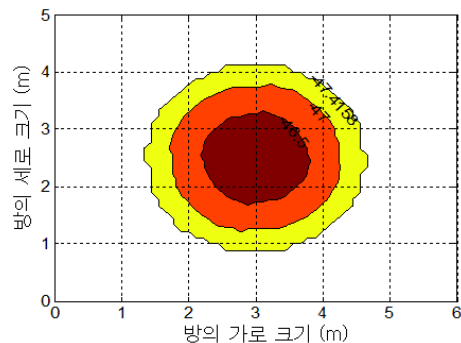


그림 5. 유효 반사 계수가 0인 경우
 Fig. 5. Effective reflection index = 0

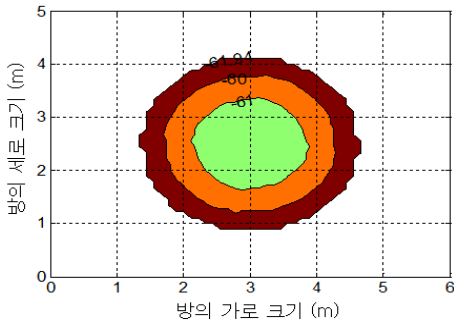


그림 6. 유효 반사 계수가 0.13인 경우
Fig. 6. Effective reflection index = 0.13

V. 운용 주파수

주파수가 100 GHz, 200 GHz인 밀리미터파에 대한 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 가구가 없는 빈 방에서 Direct LOS에 대한 결과이고 방의 크기는 6×5×2.5 m, 빔폭은 70°이다. 프리스 방정식 (Friis equation)에 따라 주파수가 높아질수록 수신 레벨이 작아짐을 알 수 있다.

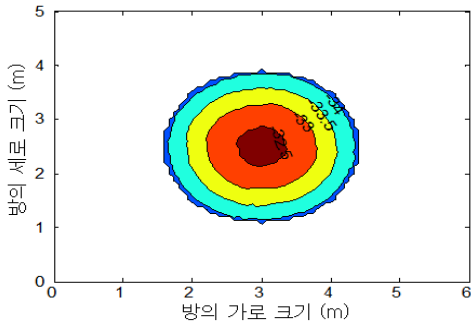


그림 7. 주파수가 100 GHz인 경우의 수신레벨
Fig. 7. Received power level (dBm) at 100 GHz frequency

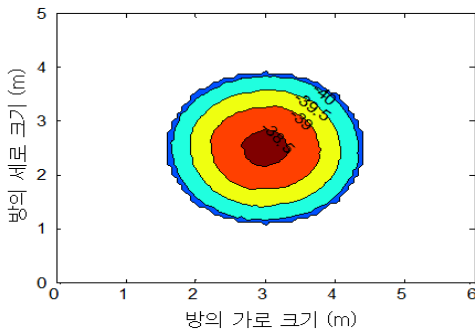


그림 8. 주파수가 200 GHz인 경우의 수신레벨
Fig. 8. Received power level (dBm) at 200 GHz frequency

VI. 가구배치에 의한 실내전파 특성

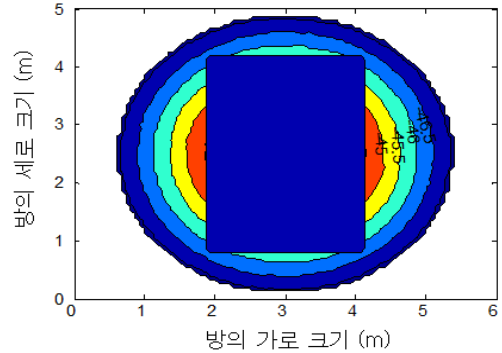


그림 9. 방 중앙에 테이블이 있는 경우의 LOS 수신레벨
Fig. 9. Received power level (dBm) from LOS (a table is located center of room)

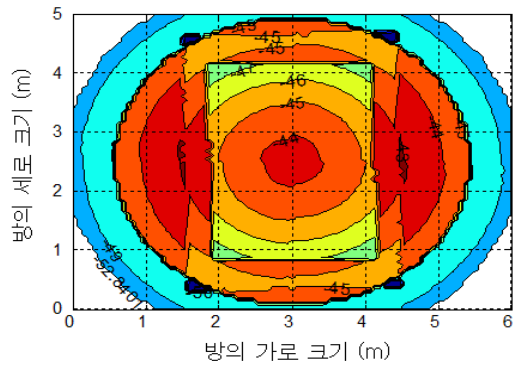
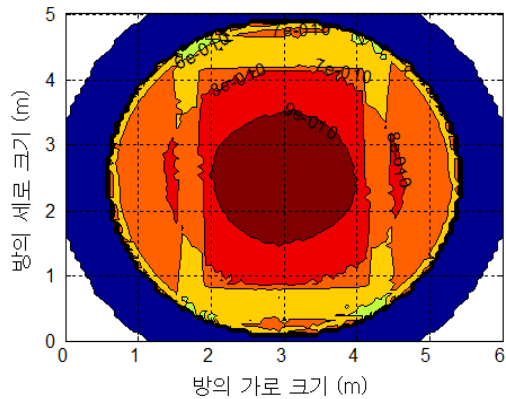


그림 10. LOS, 투과파, 바닥에 의한 반사파에 의한 수신레벨
Fig. 10. Received power level (dBm) from LOS, transmitted wave and reflected wave



가로 2 m, 세로 3 m의 사각 테이블이 방 중앙 0.5 m의 높이에 놓여 있을 때의 시뮬레이션 결과를 그림 9에 나타내었다. 빔 폭은 100°이고 LOS에 의한 결과이다. 테이블 아래 부분은 LOS 파가 도달하지 않기 때문에 어둡게 나타난다. 수신 포인트가 테이블보다 아래에 있으므로 어두운 부분이 테이블 넓이보다 더 크게 나타난다. 그림 10과 그림 11은 LOS 및 투과파, 바닥에 의한 반사된 파에 의한 수신레벨 및 RMS 시 지연 분산을 나타내었다.

VII. 결론

본 논문에서는 밀리미터파 실내 통신망 설계를 위하여 광선추적기법 기반의 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 방의 크기, 물체의 재질에 따른 반사, 투과 특성, 안테나의 빔 폭 및 편파특성, 송수신기의 배치, 운용 주파수를 고려하였고, 임의의 위치에 평면형의 가구를 배치하였다. 그리고 LOS 및 반사파와 투과파를 고려하였다. 방의 천정 중앙에 송신기를 위치시켰고, 수신기는 방의 일정한 높이에 펼쳐져 있도록 하였다. 이러한 시뮬레이션을 통해 각 수신기에서의 시 지연 분산 결과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서는 향후 무선 통신의 미래라는 밀리미터파 실내 전파 환경을 분석함으로써 실험에 의해 직접 전파 환경을 예측해야 하는 번거로움을 없앴고, 시뮬레이션에 의해 밀리미터파 실내 전파 환경을 예측함으로써 송수신 시스템의 파워 마진 (power budget)을 예측할 수 있었다.

References

[1] S. Cherry, "Edholm's law of bandwidth", *IEEE Spectrum*, Vol. 41, No. 7, pp. 58 - 60, 2004.
 [2] W-H. Lee, T-J. Chung, "Analysis of Propagation Environments for Indoor Wireless Communication Systems at THz Frequencies", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-6, 2010.
 [3] S. K. Kim, "Fabrication of Millimeter Wave Radiometer", *The Journal of The Institute of Internet,*

Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 12, No. 3, pp. 71 - 74, 2012.
 [4] A. Siamarou, "Broadband Wireless Local-Area Networks at Millimeter Waves Around 60 GHz," *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, Vol. 45, No. 1, pp. 177-181, 2003.
 [5] R. Vaughan, J. B. Andersen, *Channels, Propagation and Antennas for Mobile Communications*, IEE, 2003.
 [6] D. J. Y. Lee, W. C. Y. Lee, "Propagation Prediction in and Through Buildings," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol. 49, No. 5, pp. 1529-1533, 2000.
 [7] M. F. Iskander, Z. Yun, "Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems," *IEEE Trans. Microwave Theory Technology*, Vol. 50, No. 3, pp. 662-672, 2002.
 [8] K. Rizk et al., "Two-Dimensional Ray-Tracing Modeling for Propagation Prediction in Microcellular Environments," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol. 46, No. 2, pp. 508-518, 1997.
 [9] C-F. yang, B-C. Wu and C-J. Ko, "A ray-tracing method for modeling indoor wave propagation and penetration," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 46, No. 6, pp. 907-919, 1998.

저자 소개

이 원 희(정회원)



- 2000년 : 건국대학교 전자정보통신 공학과 공학석사
 - 2003년 : 건국대학교 전자정보통신 공학과 공학박사
 - 1998년 ~ 1999년 : 건국대학교 전자정보통신공학과 교육조교
 - 1999년 : 전자부품연구원 위촉연구원
 - 2000년 ~ 2002년 : 대림대학교 디지털전자과 외래교수
 - 2002년 ~ 2008년 : LG전자 DA연구소 책임연구원
 - 2008년 ~ 2009년 : POSTECH Post Doc.
 - 2009년 ~ 2016년 : 한국전자통신연구원 선임연구원
 - 2016년 ~ 현재 : 서일대학교 정보통신과 조교수
- <주관심분야 : 무선 데이터 및 영상 통신, 이동통신, 무선통신 시스템, 밀리미터파 및 테라헤르츠 응용>

표 성 민(정회원)



- 2002년 : 고려대학교 전기전자전파 공학부 공학사
- 2004년 : 고려대학교 전파공학과 공학석사
- 2011년 : 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 공학박사
- 2011년 3월 ~ 2011년 10월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2011년 11월 ~ 2013년 2월 : 국방과학연구소 선임연구원
- 2013년 2월 ~ 현재 : 한밭대학교 정보통신공학과 조교수
<주관심분야 : 마이크로파/밀리미터파 회로 및 시스템, 메타물질 기반 재구성 안테나, 추적 레이더 시스템>