

논문 2010-2-1

# THz 실내 무선 통신시스템을 위한 전파환경 분석

## Analysis of Propagation Environments for Indoor Wireless Communication Systems at THz Frequencies

이원희\*, 정태진\*

Won-Hui Lee and Tae-Jin Chung

요 약 근거리 무선 통신시스템은 사무실과 가정의 응용으로 빠르게 확장하고 있다. 무선 네트워크의 개발은 더 높은 data rate의 요구를 만족하도록 수행되었다. 이것으로 높은 주파수에서 동작하는 통신시스템 개발의 필요성이 강조된다. 따라서 근거리 무선 통신 네트워크는 테라헤르츠 주파수 쪽으로 옮겨갈 것으로 기대된다. 실내의 벽과 바닥, 천장에 의해 발생하는 전파 환경 분석은 3차원 광선방출기법을 이용하였다. 또한 테라헤르츠 주파수에서의 rough한 건물 벽면의 특성을 파악하기 위해 광학적으로 두꺼운 smooth한 건물 재질의 반사 모델로부터 접근하여 나타내었다. 전파환경 시뮬레이션 결과평균 수신 전력이 참고문헌의 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 실내 공간의 크기가 6m(L)×5m(W)×2.5m(H)에서 콘크리트 벽의 경우 RMS 지연시간은 9.11 ns로 계산되었다.

**Abstract** Short-range wireless communication systems are expanding at rapid rate, finding application in offices and homes. Development of wireless local network is accompanied by steady increase in the demand for ever higher data rates. This in turn entails the necessity to develop communication systems which operate at higher frequencies. It can be expected that short-range wireless communication networks will soon push towards the THz frequency range. We use a 3D ray-launching for analysis of propagation environments at the indoor fixtures. We extended the approach from the modeling of the reflectivity of optically thick, smooth building materials at THz frequencies to materials with a rough surface. The simulation result of propagation environment is similar to average received power of reference paper. The RMS delay spread was calculated to be 9.11 ns in a room size of 6m(L)×5m(W)×2.5m(H) for the concrete plaster.

**Key Words :** Terahertz communication, THz channel modeling, Ray-launching, Rough surface

### I. 서 론

무선 통신 기술은 나날이 발전을 거듭하고 있으며, 이동 통신 서비스는 정보화 사회의 핵심적인 인프라가 되었다. 기존의 마이크로웨이브 대역 주파수 자원 고갈로 인하여 점점 더 높은 주파수 대역의 활용이 불가피하게 됨과 아울러 멀티미디어 통신에 대비하여 넓은 대역폭을 확보할 수 있는 테라헤르츠 통신망에 관한 연구는 매우 중요한 연구 과제이다<sup>[1],[2]</sup>. 가까운 미래에 실내 근거리

무선 통신시스템은 10 Gbps의 전송속도를 유지할 것이고, 매우 큰 대역폭이 요구될 것이다. 테라헤르츠 주파수는 이러한 요구에 부합하는 가장 기대되는 주파수이다.

테라헤르츠 통신시스템의 전파 해석을 위해서는 건물 재질 즉, 광학적으로 두꺼운 거친 표면(rough surface)의 반사 특성 분석이 필요하다. 테라헤르츠와 같이 주파수가 높아지면 마이크로웨이브 대역에서 무시해도 될 정도의 건물 재질이 반사계수에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 테라헤르츠 주파수에서 거친 표면의 반사 특성을 분석함으로써 실내 테라헤르츠 통신시스템의 전파 해석의 기틀을 마련하고자 한다. 또한 본 논문에서는 3차원

\*정회원, 한국전자통신연구원(ETRI)

접수일자 2010.3.2, 수정일자 2010.4.16

광선방출(3D ray-launching)기법을 이용하여 테라헤르츠 전파 예측을 위한 이론을 정립하고, Link 구성 시나리오와 전파 모델링에 대하여 나타내었다.

## II. 본 론

### 1. 테라헤르츠 통신 설계 파라미터

테라헤르츠 통신의 특징은 광대역, 소형화, 10 Gbps의 고속 데이터 전송의 장점이 있는 반면에 장애물에 의한 다중 경로 페이딩(multi-patch fading) 현상이 매우 심하고, 파워의 한계가 있으며, 링크 버짓(Link budget)이 tight한 단점이 있다. 그러나 주파수 자원의 한계가 있는 현재의 통신시스템에서 10 Gbps의 고속 데이터를 전송하기 위해서는 테라헤르츠의 연구가 필수적으로 요구된다. 이러한 테라헤르츠 통신의 링크 버짓 분석을 위한 설계 파라미터는 커버리지 길이(patch length), 자유공간 손실, RMS 지연시간, 송신 전력, 송/수신 안테나 이득, 시스템 S/N비, 수신기 잡음 등이 있다. 그림 1에는 간단한 회의실 구조에 대한 path loss를 측정하여 전파환경 수신 레벨에 의한 AP(Access point)를 나타내었다.

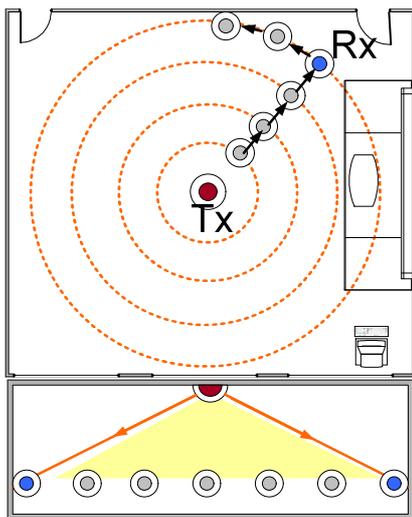


그림 1. 기본적인 방의 구조  
Fig. 1. Structure of general room

### 2. 광선방출기법

광선방출기법은 송신기에서 방출되는 전파를 유한 개의 광선으로 대체시켜 각 광선을 차례로 출발시키면서 수신기에 도달할 때까지의 경로를 추적하여 나가는 기법

으로 추적된 다중 경로를 따라 수신기에 수신되는 모든 광선들의 전력을 합산함으로써 경로손실이나 RMS 지연시간을 계산하는 방법으로 다양한 환경에서도 정확히 전파를 예측할 수 있고 전계 강도의 예측뿐만 아니라 디지털 통신망 설계에 필요한 채널의 지연시간 특성의 계산을 위하여도 매우 유용한 방법이다. 그림 2에는 광선방출기법을 도시하였다.

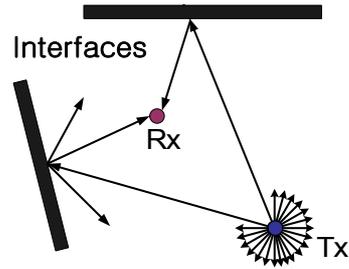


그림 2. 광선방출기법  
Fig. 2. Ray launching technique

### 3. 3차원 광선방출 송/수신기

광선방출기법은 송신기에서 3차원 공간의 전방향으로 고루 광선을 방출시켜 모든 방향으로의 전파의 경로를 추적하게 된다. 따라서 송신단에 있어 전파의 공간상 방출 밀도를 균일하게 하고 측정에 충분한 수의 광선이 방출되어야 한다. 균일한 광선의 송신을 위해서는 삼각형을 기본 다각형으로 한 정12각형에서 이를 더 작은 셀로 나누어가는 방법들이 제시되고 있으며 그림 3은 이의 예이다. 구체적인 구현 방법으로 단위 구에 내접하는 정20면체를 생각하는 것이다. 구의 중심에서 출발하여 정20면체의 각 꼭지점들을 통과하는 벡터의 방향으로 광선을 방출시키면 이웃하는 광선들 사이의 사의 각은  $63.7^\circ$ 로 모두 같게 된다. 정20면체의 꼭지점은 12개이므로 이렇게 방출시킬 수 있는 광선의 수는 12개이다. 광선들의 수 12개는 광선추적기법에 사용하기에는 너무 부족한 수이므로, 이 광선들의 개수를 증가시키기 위해 정20면체의 각 면을 이루는 정삼각형을 4개의 작은 정삼각형들로 분할하고, 분할된 작은 삼각형들의 꼭지점을 통하여 광선을 방출시키면 한 면에서 방출되는 광선의 개수는 두 배로 늘어난다<sup>[3],[4]</sup>. 광선의 개수를 더 많이 늘려면 나누어진 삼각형들을 또 다시 분할하는 방법으로 계속해 나가는 방법이 제시되었다. 한편, 균등하게 삼각형으로 셀(cell)을 나누어 주는 방법으로 충분한 셀로 나누어 셀의 꼭지점들을 광선의 발산 지표로 삼는 것도 제시되었다.

실제 시뮬레이션에 있어서는 각 공간상으로 방출되는 광선을 공간상의 세 축으로 그 값을 나누어 전 방향으로 방출하게 될 것이고, 특히 송/수신단에 사용하는 안테나의 빔 특성을 고려한 광선 특성도 고려되어 전방향으로 방출되는 광선에 적용되어야 한다.

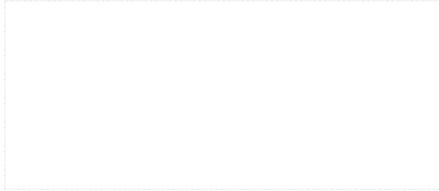


그림 3. 광선방출 송신 방법  
Fig. 3. The transmission method of ray launching

수신 전력의 계산에 있어 제안된 방법으로 추적된 전파(광선)의 정보를 설정한 수신구(Reception sphere)를 통해 계산하는 수신구 모델을 소개한다. 총 수신 전력의 계산에 있어 설정된 수신구와 교차되는 모든 전파들이 그 고려 대상이 되며 소스로부터 하나의 광선만을 인식하기 위하여 광선들 사이 거리에 대한 적절한 수신구의 반경을 결정하게 된다. 그림 4에는 그러한 수신구 반경을 나타내었다.

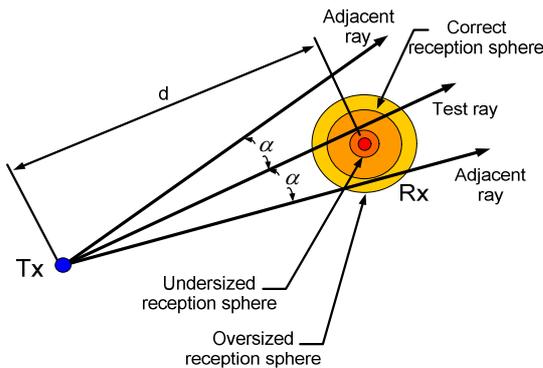


그림 4. 수신구 반경  
Fig. 4. A radius of received sphere

만약 반경이 적절하게 설정되지 않는 경우 이중 수신 이 되게 된다. 이러한 경우 이중 수신에 의해 인식되는 파워가 두 번 계산되어 전체 수신구를 통한 파워 레벨이 증가할 수 있고 따라서 수신 레벨에 있어 큰 오차를 내게 된다. 이중 수신을 방지하기 위해 수신구 반경을 수신구 위치에 따라 결정되는 입사파의 각도에 따라 설정해야 하며 3차원 수신구 반경( $r$ )은 식 (1)과 같다.

$$r = \frac{\alpha d}{\sqrt{3}} \tag{1}$$

#### 4. 전파손실과 시지연분산

그림 5와 같이 송신단에서 수신단으로 들어오는 신호는 직접파(LOS, Line Of Sight)와 다중경로 반사파 등이 있다. 테라헤르츠 주파수는 파장이 매우 짧아 직접파가 주로 작용하고, 다중경로 반사파의 영향은 매우 미약하다.

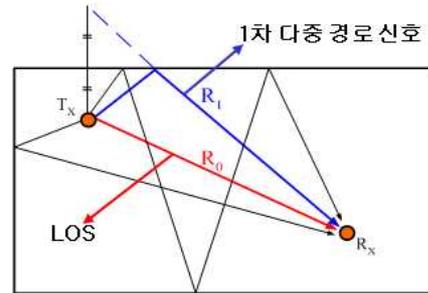


그림 5. 송신단으로 부터의 다중경로 신호  
Fig. 5. Multipath signal from the transmitter

상기의 직접파와 다중경로 반사파가 존재하는 환경에서의 전파손실과 RMS 지연시간은 식 (2)~(4)로 계산된다. 직접파 신호의 수신전계 강도는 식 (2)와 같고, 1차 반사파 신호의 수신전계 강도는 식 (3)과 같다.

$$E_{r0} = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} E_0 \tag{2}$$

$$E_{r1} = \frac{\lambda}{4\pi} \Gamma_1 \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} E_0 \tag{3}$$

RMS 지연시간은 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\tau_{rms} = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \tag{4}$$

여기서,

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N P_i}, \quad \bar{\tau}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \tau_i^2}{\sum_{i=1}^N P_i}$$

이고, P는 수신전력을 나타낸다.

5. Rough Surface의 반사특성

테라헤르츠 통신시스템의 전파 해석을 위해서는 건물 재질 즉, rough surface의 반사특성 분석이 필요하다. 테라헤르츠와 같이 주파수가 높아지면 마이크로웨이브 대역에서 무시해도 될 정도의 건물 재질이 반사계수에 영향을 미치게 되기 때문이다. 그림 6은 rough surface의 반사특성을 나타내었다. 일반적인 smooth surface와는 다른 반사계수를 갖으며 따라서, 반사계수를 다시 정의할 필요가 있다.



그림 6. Rough surface의 반사특성(우측그림)  
Fig. 6. Reflection characteristic of rough surface (the right view)

일반적인 smooth surface의 반사계수는 Fresnel equation에 의해 식 (5)과 같이 나타낸다<sup>[5]</sup>.

$$\gamma_{TE} = \frac{Z \cos \theta_i - Z_0 \cos \theta_t}{Z \cos \theta_i + Z_0 \cos \theta_t} \quad (5)$$

$$\gamma_{TM} = \frac{Z \cos \theta_t - Z_0 \cos \theta_i}{Z \cos \theta_t + Z_0 \cos \theta_i}$$

그러나 rough surface 경우는 smooth surface와 같이 나타낼 수 없으므로, modified Fresnel equation을 이용하여 계산한다. modified Fresnel equation은 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma'_{TE} = \rho \cdot \gamma_{TE} \quad (6)$$

$$\gamma'_{TM} = \rho \cdot \gamma_{TM}$$

여기서,  $\rho$ 는 Rayleigh roughness factor이고,  $\rho = e^{-\frac{g}{2}}$ 로 나타낸다. Rayleigh roughness factor는 수식상 다음과 같은  $g$  값을 포함한다. 여기서,  $g = \left(\frac{4\pi\sigma\cos\theta_i}{\lambda}\right)^2$ 이다.

$\sigma$ 는 표면 거칠기의 표준편차(단위; mm)이고,  $\theta_i$ 는 입사 및 반사각,  $\lambda$ 는 입사파 캐리어 주파수의 파장이다.

식 (6)의 수식에서 보면 표면 거칠기의 표준편차가 클수록 반사계수가 감소함을 알 수 있다. 또한, 수식상에  $\lambda$ 가 있으므로, 반사계수가 주파수에 의존함도 알 수 있다.  $\sigma$  즉, 표면 거칠기의 표준편차는 3차원 측정기를 이용하면 정확히 측정될 수 있다. 그림 7에는 rough surface의 반사특성 분석결과를 나타내었다. 결과를 보면, 일반적인 smooth surface에서는 주파수에 따라 반사계수가 일정한 반면, rough surface의 반사계수는 주파수가 증가함에 따라 감소함을 볼 수 있다.

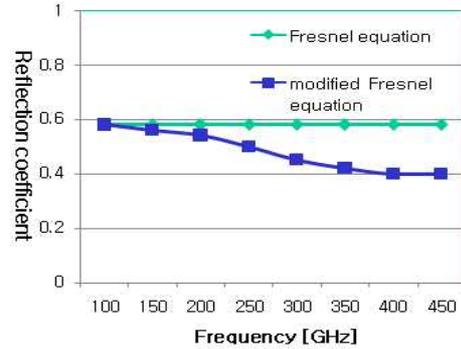


그림 7. Rough surface의 반사특성 그래프(TE편파)  
Fig. 7. Reflection characteristic graph of rough surface(TE polarization)

III. 시뮬레이션 및 결과

상기의 테라헤르츠 전파 이론들을 바탕으로 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 테라헤르츠 시스템의 경우 아직 전세계적으로 실제로 구현되어 측정된 사례가 많지 않기 때문에 직접적인 실험은 현재로는 불가능하여 시뮬레이션을 진행하고 결과를 평가하였다. 평가를 위해 독일에서 발표한 논문<sup>[6]</sup>을 참조하였고, 같은 시뮬레이션 파라미터를 적용하여 결과를 확인하였다. 시뮬레이션 조건은 6×5×2.5m의 방의 크기에서 Tx가 방의 중심에 위치하고, Rx는 방의 0.95m 높이에서 확인하였다. 테라헤르츠 주파수의 경우 강우나 산소에 의한 감쇠가 심하므로<sup>[7]</sup> 대기 중의 통신으로 적합하지 않고, 실내 통신 응용으로 이용할 수 있다. 그림 8은 실내에서 안테나가 천장 중심에 있을 때 광선방출기법을 이용하여 시뮬레이션 한 Contour 결과이다. 주파수는 350 GHz에서 시뮬레이션 하였고, 벽면으로부터의 반사가 한번 있다고 가정하였으며, 벽면 재질이 rough한 콘크리트

(concrete)로 둘러싸여 있는 경우를 가정하였다. 표 1은 문헌에 있는 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 최대 수신전력과 최소 수신전력 그리고, 평균 수신전력을 나타내었다. 결과를 보면, 참고 문헌<sup>[6]</sup>과 근접한 결과를 얻었고 그 비교 분석 값으로 개발한 전파환경 예측 모델의 타당함을 증명하였다.

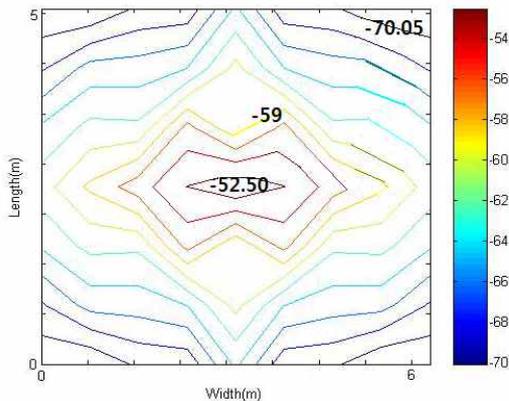


그림 8. 전파환경 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Simulation results of propagation environments

표 1. 1번 반사 경우의 수신 전력(TE편파)  
Table. 1. Received power for single bounce(TE polarization)

Single-bounce case	Max. Power [dBm]	Min. Power [dBm]	Avg. Power [dBm]
참고문헌 <sup>[6]</sup>	-54	-73	-60
시뮬레이션 결과	-52.5	-70.05	-61.26

또, RMS 지연시간은 광대역 다중 경로 채널을 결정하는 중요한 변수 가운데 하나이다. RMS 지연시간은 특히 고속 디지털 통신시스템에서 결정적인 영향을 미친다. 본 시뮬레이션에서는 RMS 지연시간 계산 결과 9.11 ns 값을 얻었다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 테라헤르츠 전파환경을 시뮬레이션하여 테라헤르츠 주파수에서의 전파 특성을 분석하였다. 일반적인 마이크로파 대역과 다르게 테라헤르츠 주파수

에서는 건물 벽면의 재질 또는 거칠기에 따라 다른 전파 특성을 나타낸다. 건물 벽면이 smooth한 surface인지 rough한 surface인지에 따라 전파 특성이 달라지며, 본 논문에서는 광선방출기법에 rough한 surface에 따른 반사계수를 적용하여 테라헤르츠 전파환경을 분석하고자 하였다. 측정 결과 참고문헌<sup>[6]</sup>의 결과와 근사한 결과를 얻었고, 개발한 전파환경 예측 모델이 정확함을 알 수 있었다.

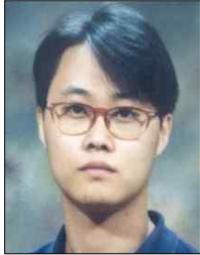
#### 참고문헌

- [1] R. Piesiewicz, et al., "THz channel characterization for future wireless gigabit indoor communication systems", Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics IV, pp. 166-176, 2005.
- [2] M. Jacob, T. Kürner, "Radio Channel Characteristics for Broadband WLAN/WPAN Applications Between 67 and 110 GHz, 3rd European Conference on Antennas and Propagation, pp. 2663-2667, 2009.
- [3] G. Durgin, N. Patwari, T. S. Rappaport, "An advanced 3D ray launching method for wireless propagation prediction", Vehicular Technology Conference, Vol. 2, pp.785-789, 1997.
- [4] T. Manabe, Y.Miura, T. Ihara, "Effects of antenna directivity and polarization on indoor multipath propagation characteristics at 60 GHz", IEEE Selected Area Communications, Vol. 14, pp. 441-448, 1996.
- [5] R. Piesiewicz, et al., "THz channel characterization of building materials", Electronics Letters, 1st., Vol. 41, No. 18, pp. 1002-1004, 2005.
- [6] R. Piesiewicz, et al., "Performance Analysis of Future Multigigabit Wireless Communication Systems at THz Frequencies with Highly Directive Antennas", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 14, No. 2, pp. 421-430, 2008.
- [7] Peter H. Siegel, "Terahertz technology", IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol. 50, No. 3, pp. 910-928, 2002.

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 정보통신 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [KI002056, 테라헤르츠 대역 전파환경 및 무선전송 플랫폼 기술연구].

저자 소개

이 원 희(정회원)



- 2000년 건국대학교 전자정보통신공학과, 공학석사
- 2003년 건국대학교 전자정보통신공학과, 공학박사
- 1998년~1999년 건국대학교 전자정보통신공학과, 교육조교
- 1999년 전자부품연구원 고주파재료연구센터, 위촉연구원

- 2002년~2008년 LG전자 디지털어플라이언스연구소, 책임연구원
  - 2008년~2009년 포항공과대학교 전자전기공학과, Post Doc.
  - 2009년~현재 한국전자통신연구원, 선임연구원
- <주관심분야 : Dielectric Loaded Resonators, Microstrip Antennas, Microwave Oven, Microwave Plasma Applications, EMI/EMC, THz Communication Systems, Channel Modeling>

정 태 진(정회원)



- 1979년 충남대학교 전자공학과, 공학사
- 1979년~1983년 국방과학연구소, 연구원
- 1983년~1984년 대우중공업(주), 대리
- 1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과, 공학석사

- 2004년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과, 공학박사
  - 1984년~현재 한국전자통신연구원, 책임연구원
- <주 관심분야 : 마이크로파 및 밀리미터파 RF/IF 시스템 설계, 통신시스템 기저대역(BB) 모델 설계>