논문-00-5-2-13

실내에서의 800MHz 대역 채널 특성 분석

곽 도 영*, 이 종 호*, 최 준 수**, 김 성 철*

Indoor Wireless Channel Characteristics at 800MHz

Do-Young Kwak*, Jong-Ho Lee*, Joonsoo Choi** and Seong-Cheol Kim*

요 약

건물 외부에 위치하는 송신기와 건물 내부에 위치하는 수신기 사이의 채널 특성을 분석하기 위해 전파 추적 기법을 기반으로 한 모의 실험을 수행하였다. 본 모의 실험에서는 건물 내에 29개의 수신기를 설치하고, 각 수신기에서의 수신 특성을 다중 경로를 통해 수신된 여러 개의 신호의 상호 간섭 패턴을 이용하여 분석하였다. 모의 실험 결과에서 수신기의 위치와 송신기의 위치 및 전파의 편파 특성에 따라 수신 특성이 다르게 나타났고, 상쇄 간섭으로 인해 창가 쪽에 위치한 수신기의 수신 파워가 건물 안 쪽에 위치한 수신기의 수신 파워보다 작게 나타나는 경우도 있었다. 본 논문에서는 채널 파라미터들, 즉 mean excess delay와 rms delay spread를 통해 송신기와 수신기간의 채널 특성 분석도 수행하였다.

Abstract

Channel characteristics between the outdoor transmitter far away from the building and receivers inside the building are explored theoretically using ray tracing technique. In this paper, 29 receivers are located on the single floor of the building to observe the variation of channel properties depending on receiver location. For each receiver, amplitudes and phases of all the possible rays form the transmitter to the receiver are traced to obtain impulse response. Statistical results for rms delay spread and power delay profiles for representative receiver location are given.

I. 서 론

수신기가 송신기로부터 원거리에 위치하는 경우, 송신기로부터 나온 전파는 수신기 근처에 평면파(plane wave)의 형태로 도달한다. 또한 수신기가 건물 내부에 위치할 때는 송신기로부터 수신기까지의 LOS(Line of Sight) 경로를 확보할 수 없게 되어 수신기에 도달하는 전파는 건물 벽에서의 여러 번의 투과와 반사를 거쳐 도달한다. 이 때 수신기에 수신되는 신호는 수신기에 도달한 여러 전파들의 간섭들로 결정되고, 이러한 전파들은 건물 내부에서의 전파 경로(propagation path)에 의해 그 크기와 위상이 결정된다. 즉, 건물 내에서 다중경로를 통해 수신기에 도달한 전파들은 그 각각이 다른 경로로 인한 크기와 위상의 차이를 가지고 있으며 이러한 차이를 가진 전파들이 보강 또는 상쇄 간섭을 일으켜 수신 신호를 결정한다.

이러한 건물 내에서의 다중경로 환경은 신호의 세기 변화 뿐 아니라 디지털 신호의 시확산(time spreading) 현상을 야기하여 디지털 신호의 부호간 간섭 현상을 유발한다. 따라서 이러한 부호간의 간섭 현상을 효율적으로 극복하

* 서울대학교 전기 · 컴퓨터 공학부
Seoul National Univ.
** 국민대학교 컴퓨터학부
Kookmin Univ.

기 위해서는 기지국과 수신기간 채널의 정확한 시확산 모델이 필요하다.

채널의 특성을 파악하는 방법은 크게 측정을 통해 확률론적으로 파악하는 방법과 모의 실험을 통해 결정론적으로 파악하는 방법의 두 가지로 나뉘어진다.

측정을 통한 확률론적인 방법은 방대한 데이터를 바탕으로 해야 하기 때문에 많은 시간과 비용을 필요로 한다는 단점이 있는 반면, 모의 실험을 통한 결정론적인 방법은 시간과 비용을 절약할 수 있으며 site-specific한 특성을 지니고 있다. 본 논문에서는 이론적인 전파전파(wave propagation) 모델을 바탕으로 원거리에 위치한 송신기로부터 실내에 위치한 수신기에 도달한 평면파들의 간섭현상을 모의 실험함으로써, 임의의 수신 위치에서의 정확한 수신 특성을 예측하고, 채널의 특성을 제시하고자 한다.

본 논문의 제 2장에서는 전파 추적 기법에 관해 간단한 소개를 하고, 제 3장에서는 모의 실험 환경에 관해 언급을 할 것이며, 제 4장에서는 모의 실험 결과를 바탕으로 채널의 특성을 분석할 것이다. 마지막으로 제 5장에서는 본 논문의 결론을 맺을 것이다.

Ⅱ. 전파 추적 기법

전파 추적 기법은 고주파의 신호를 광선으로 모델링하는 것을 기본으로 한다. 송신기로부터 나온 전파는 수신기가 위치한 건물 근처에 평면파의 형태를 지니며 도달한다. 따라서 이러한 평면파를 모델링하기 위해 먼저 건물로부터 일정 거리 떨어진 위치에 하나의 가상의 선을 설정하고 이 선에 도달한 전파들은 그 선에 직교하게 도달하고 모두 같은 크기와 위상을 가진다고 가정한다. 그리고 그 선 위에 독립적이고 평행한 광선들의 모임이 존재한다고 가정하고, 그 각각의 광선들의 모임을 수신기가 위치한 건물 근처에 도달한 평면파로 모델링한다. 본 모의 실험에서는 평면파로 모델링된 각각의 광선들의 경로를 추적함으로써 수신기에 도달하는 신호의 크기와 위상을 예측한다[1][2][3]. 그림 1은 이러한 전파 추적 기법의 개념을 나타낸 것이다.

1. Binary Tree 및 Capture Circle

광선이 진행하다 벽을 만나게 되면 그 중 일부는 투과하고 일부는 반사된다. 이렇게 나뉘어진 두 광선이 다시

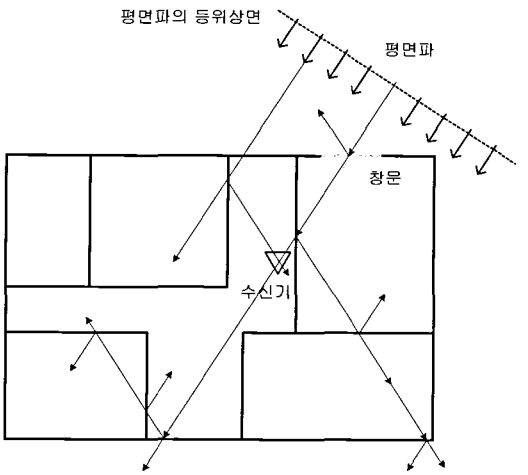


그림 1. 전파 추적 기법의 개념도
Fig. 1. The concept of ray-tracing

벽을 만나면 네 개, 여덟 개로 나뉘어지는 과정을 계속 반복적으로 겪는다. 전파 추적 기법에서는 이러한 일련의 과정을 binary tree 구조로 해석하고, 광선이 진행하다 만나게 되는 벽을 binary tree의 레벨로 설정한다[1][2][3]. 그림 2는 이러한 binary tree를 나타낸 그림이다.

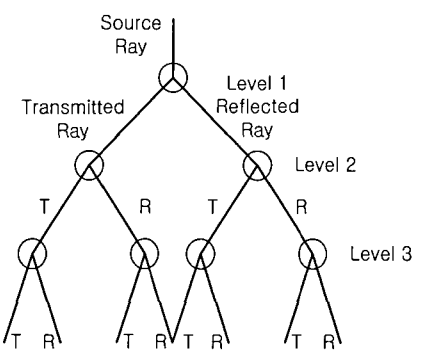


그림 2. Binary tree의 개념도
Fig. 2. The concept of binary tree

처음에 평면파를 일정한 간격을 가지는 독립적이고 평행한 광선으로 모델링하였다. 하지만 이러한 각각의 광선들은 실제로는 약간의 폭을 가지는 전파빔을 나타내고, 수신기에 신호가 수신되는 과정은 수신기로 모델링되는 점이 전파빔의 폭 안에 포함될 때 수신기에 신호가 수신되었다고 생각한다. 전파 추적 기법에서는 선의 형태로 광선의 경로를 추적하므로 광선의 폭을 고려하기 위해서 수신기의 capture circle을 설정하고 이 원 내에 광선이 지나가

면 신호가 수신기에 수신되었다고 생각한다. capture circle의 반지름 r과 평행한 광선들 간의 간격 s와의 관계는 식 (1)과 같다.

$$r = s / 2 \tag{1}$$

그림 3은 수신기에 신호가 수신되는 과정을 나타낸 것이다[3].

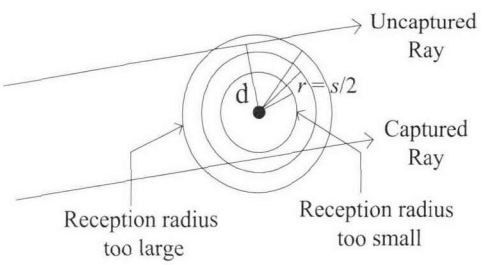


그림 3. Capture circle의 개념도
Fig. 3. The concept of capture circle

2. 수신 신호의 E-field 및 Wall Characterization

수신기에 수신되는 신호의 E-field는 식 (2)와 같이 구할 수 있고, 각각의 변수가 의미하는 것은 표 1에 나타난 것과 같다[2].

$$E_i = E_0 f_{ti} f_{ri} L_i(d) \prod_m \Gamma(\theta_{mi}) \prod_n \mathrm{T}(\theta_{ni}) e^{-jkd} \tag{2}$$

변수	변수의 의미
f_{ti}	송신안테나의 방사 패턴
f_{ri}	수신안테나의 방사 패턴
$L_i(d)$	i번째 다중 경로 전파의 경로 감쇠
d	경로 거리 [meter]
$\Gamma(\theta_{mi})$	반사 계수
$T(\theta_{ni})$	투과 계수
E_i	i번째 다중 경로 전파의 전기장의 세기 [V/m]
E_0	송신 전기장의 세기 [V/m]
e^{-jkd}	경로 거리로 인한 수신 전파의 위상

표 1. 수신 신호의 E-field를 구하는 식의 변수들
Table 1. Summary of the variables used to obtain the E-field

본 모의 실험에서 송신 전기장의 기준 세기 E_0는 평면파의 등위상면에서의 전기장의 세기로 두었으며 그 크기는 1 [V/m]로 설정하였다. 또한 편의상 송신안테나와 수신안테나를 무지향성 안테나로 가정하였으며, 원거리에 위치한 송신기로 가정하였으므로 송신기와 건물 사이의 경로 거리에 비해 건물 내부에서의 경로 거리는 무시할 수 있을 만큼 작으므로 경로 감쇠 $L_i(d)$는 고려하지 않았고, 전파빔의 수직 확산(horizontal spreading) 역시 고려하지 않았다. 따라서 건물 내부에서의 경로 거리 d는 수신 신호의 위상 변화에만 영향을 주며 수신 전파의 세기는 벽을 통과하면서 발생한 감쇠, 즉 $\Gamma(\theta$ mi)와 $T(\theta$ ni)만으로 결정된다.

건물 벽에서 전파의 투과 및 반사 특성을 결정하는 투과 및 반사 계수는 전파가 벽에 입사하는 각도와 전파의 주파수, 그리고 벽의 두께와 재질에 의해서 결정된다. 여기서는 E-field와 H-field의 경계 조건을 이용하여 벽의 투과 및 반사 계수를 구하였다[4][5]. 그림 4와 그림 5는 800MHz에서 유리와 유리 사이에 공기층이 존재하는 이중창에서의 투과 및 반사 계수를 수평 편파와 수직 편파 두 가지 경우에 대해서 구한 그림이다.

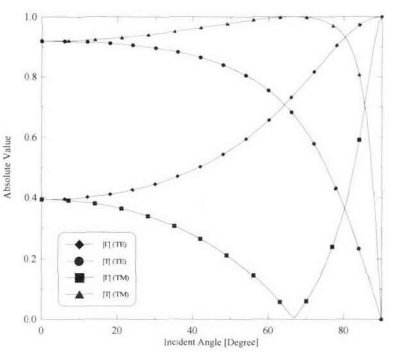


그림 4. 이중창에서의 투과 및 반사 계수의 절대치
Fig. 4. The absolute value of Γ&T at double window

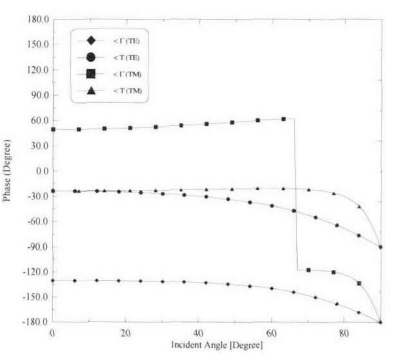


그림 5. 이중창에서의 투과 및 반사 계수의 위상
Fig. 5. The phase of Γ&T at double window

Ⅲ. 모의 실험 환경

2장에서 언급한 전파 추적 기법을 이용하여 실제 건물에 대해 모의 실험을 수행하였다. 그림 6은 모의 실험의 대상이 된 건물의 평면도이고, 각 점들은 수신기를 나타내며 각 점의 옆에 쓰여져 있는 숫자들은 편의상 붙인 수신기의 번호를 나타낸다. 송신기의 위치는 건물 왼쪽을 0°로 두었을 때 반시계 방향으로 각각 45°, 135°, 225°, 315°의 네 방향으로부터 입사되고 있다고 가정한다. 또한 비교를 위해 송신기의 안테나는 수평 편파와 수직 편파의 두 가지 경우로 전파를 송신하고 있다고 가정하고 모의 실험을 수행하였다.

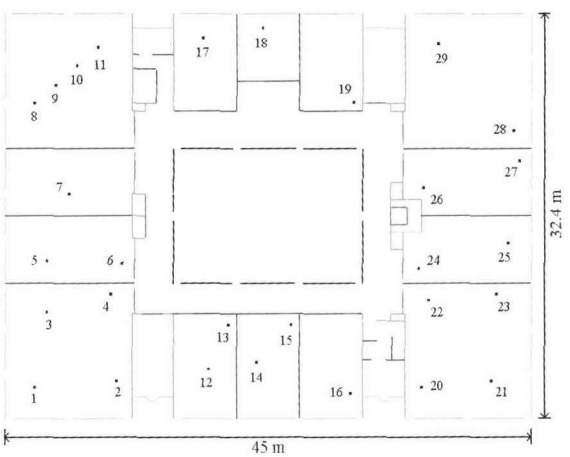


그림 6. 모의 실험을 수행한 건물의 평면도
Fig. 6. The blueprint of building simulated

건물을 이루고 있는 벽의 구조는 다음과 같다. 건물 외벽은 이중창으로 구성되어 있고, 내벽은 콘크리트 벽과 방을 구분하기 위한 경층 칸막이(석고 보드)로 이루어져 있다. 또한 건물 가운데는 비어있고, 그것을 유리창이 둘러싸고 있다. 모든 문들은 금속으로 이루어져 있고, 건물 오른쪽에 금속으로 이루어져 있는 엘리베이터가 존재한다.

Ⅳ. 모의 실험 결과 및 채널 특성 분석

1. 모의 실험 결과 분석 방법

전파 추적 기법에서 수신기에 수신된 신호는 건물 내에서의 경로 거리, 전파의 세기 및 위상, 수신기에 입사된 각도, 그리고 도착까지 걸린 시간 등의 정보를 지니고 있다. 즉, 수신기에 도달한 충격 신호(impulse signal)의 정보를 가지고 있다. 하지만 실제 상황에서 신호는 모의 실험과 같은 충격 신호가 아닌 다소의 폭을 가지는 펄스이다. 이러한 신호의 폭을 고려하기 위해서 신호가 도착한 시간에 충격 신호가 아닌 100 nsec 의 폭을 가지는 펄스가 도착했다고 가정한 다음 수신 신호를 분석하였다. 이러한 100 nsec 의 폭을 가지는 서로 다른 크기와 위상을 가진 펄스들이 약간의 시간 차이를 두고 수신기에 수신되면서 서로 보강 또는 상쇄 간섭을 일으켜 수신기의 수신 특성을 결정한다. 그림 7은 이러한 수신 특성 분석 과정을 나타낸 그림이다. 본 논문에서는 송신기에서 나온 펄스가 수신기에 도달할 때까지 겪는 신호의 왜곡(distortion)과 퍼짐(dispersion) 효과를 무시하고 수신 특성을 분석하였다.

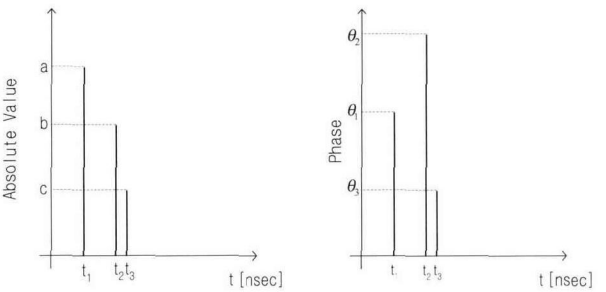


그림 7a. 수신기에 수신된 신호의 크기 및 위상
Fig. 7a. The amplitude and phase of received signal

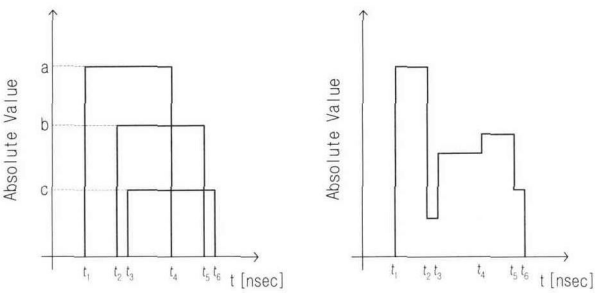


그림 7b. 펄스 폭을 고려한 수신 신호 및 수신기의 수신 특성
Fig. 7b. Received signal for transmitting pulse and the impulse response of receiver

그림 7a에서와 같이 수신기에 신호가 t1, t2, t3의 시간에 각각 a, b, c의 크기와 θ_1, θ_2, θ_3의 위상을 가지고 도달하면 각각의 수신 신호는 식 (3)과 같이 나타난다.

$$
\begin{aligned}
r(t_1) &= a e^{-j\theta_1} \\
r(t_2) &= b e^{-j\theta_2} \\
r(t_3) &= c e^{-j\theta_3}
\end{aligned}
\tag{3}
$$

여기서 각 수신 신호의 위상 θ_1, θ_2, θ_3은 경로 거리에 의한 위상 kd와 벽에서 투과와 반사가 일어날 때 생기는 위상 변화를 고려한 위상이다.

이렇게 수신된 신호를 그림 7b와 같이 각각 100 nsec의 폭을 갖는 펄스로 바꾸고, 이 펄스들의 중첩 현상을 이용하여 수신기의 수신 특성을 구한다. 수신 신호를 구하는 식은 식 (4)와 같다.

$$
r(t) = \begin{cases}
\left| a e^{-j\theta_1} \right| & , t_1 \le t \le t_2 \\
\left| a e^{-j\theta_1} + b e^{-j\theta_2} \right| & , t_2 \le t \le t_3 \\
\left| a e^{-j\theta_1} + b e^{-j\theta_2} + c e^{-j\theta_3} \right| & , t_3 \le t \le t_4 \\
\left| b e^{-j\theta_2} + c e^{-j\theta_3} \right| & , t_4 \le t \le t_5 \\
\left| c e^{-j\theta_3} \right| & , t_5 \le t \le t_6
\end{cases}
\tag{4}
$$

2. 수신 특성 및 채널 특성 분석

A. 위치에 따른 수신 특성 분석

각 수신기 위치에서의 수신 특성은 그림 8에 나타난 것과 같다. 여기서는 수신기의 위치에 따른 수신 특성을 보기 위해서 송신 전파의 입사각도를 건물 왼쪽 아래, 즉 45° 로 고정시키고, 송신 전파를 수평 편파(TE polarization)로 제한하였다. 왼쪽 그림은 각 수신기에서의 충격응답 r(t)를 voltage scale로 나타낸 것이고, 오른쪽 그림은 거의 같은 채널 특성을 겪는 주파수 대역인 coherence bandwidth를 구하기 위해 필요한 r(t)의 자기 상관 함수(autocorrelation function)를 주파수 영역에서 나타낸 것이다.

같은 방에 존재하며 벽으로부터 떨어진 거리가 거의 비슷한 2번과 3번 수신기의 경우 2번 수신기는 상쇄간섭이 일어나 신호의 세기가 작아진 반면 3번 수신기는 보강간섭이 일어나 신호의 세기가 커졌다. 따라서 coherence bandwidth도 3번 수신기가 2번 수신기에 비해 5.38 MHz에서 8.18 MHz로 커졌다는 것을 알 수 있다. 또한 벽에 가깝게 둔 19번 수신기의 경우 수신 신호가 상당히 약해져 있으나 시확산은 그리 많이 일어나지 않았고, 따라서 coherence bandwidth도 10.38 MHz로 비교적 크게 나타났다.

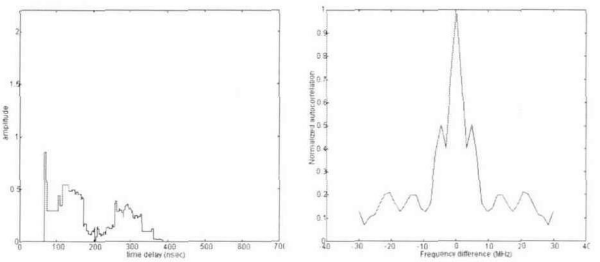


그림 8a. 2번 수신기에서의 수신 특성
Fig. 8a. Receiving characteristics of Rx 2

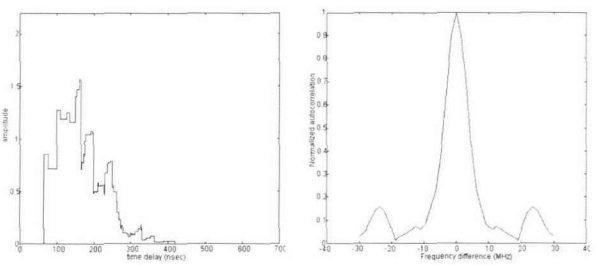


그림 8b. 3번 수신기에서의 수신 특성
Fig. 8b. Receiving characteristics of Rx 3

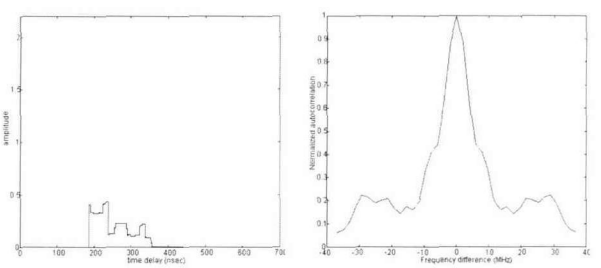


그림 8c. 19번 수신기에서의 수신 특성
Fig. 8c. Receiving characteristics of Rx 19

B. 전파의 입사 각도에 따른 수신 특성 분석

다음으로 그림 9는 비교적 벽에서 많이 떨어져 있는 10번 수신기에 대하여 송신 전파의 편파를 수평 편파로 제한하고 건물의 네 방향으로부터 송신 전파가 입사한다고 가정했을 때의 수신 특성을 나타낸 것이다.

송신 전파의 입사 각도가 다르면 수신기에 도달할 때까지의 건물 내에서의 전파 경로도 다르게 되면 다중 경로를 거친 수신 전파가 만난 벽들도 다르게 된다. 따라서 수신 위치를 고정시키더라도 입사 각도가 다르면 전혀 다른 수신 특성이 나타난다는 것을 알 수 있다.

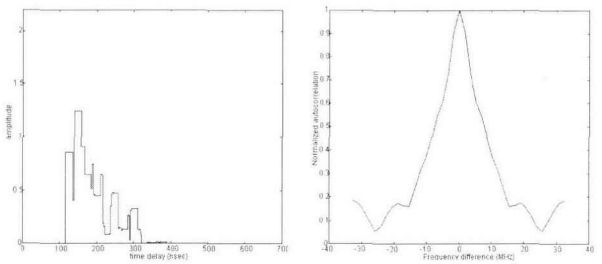


그림 9a. 45° 로 입사했을 때의 수신 특성
Fig. 9a. Receiving characteristics for incident angle of 45°

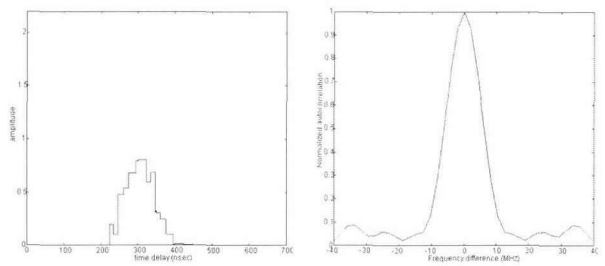


그림 9b. 135° 로 입사했을 때의 수신 특성
Fig. 9b. Receiving characteristics for incident angle of 135°

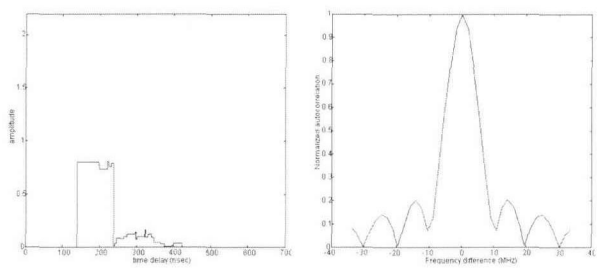


그림 9c. 225° 로 입사했을 때의 수신 특성
Fig. 9c. Receiving characteristics for incident angle of 135°

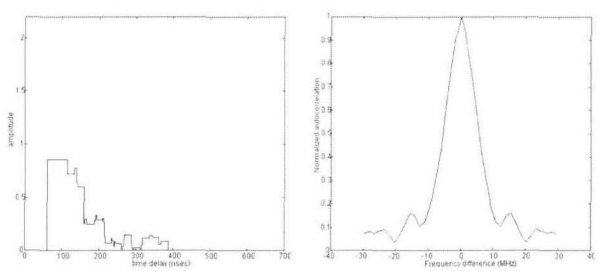


그림 9d. 315° 로 입사했을 때의 수신 특성
Fig. 9d. Receiving characteristics for incident angle of 315°

C. 수신 전파의 편파에 따른 수신 특성 분석

마지막으로 수신 위치와 입사 각도를 고정시킨 상태에서 송신 전파의 편파 차이가 수신 특성에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하였다. 그림 10은 수신기의 위치와 입사 각도를 각각 22번과 225° 로 고정시켰을 때의 송신 전파의 편파 차이에 따른 수신 특성을 나타낸 것이다.

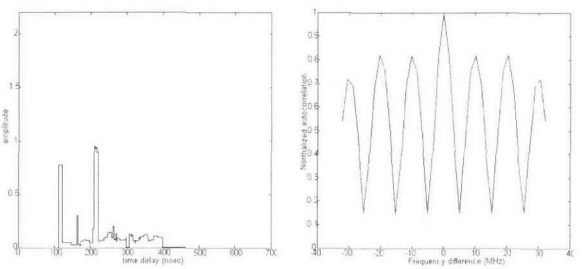


그림 10a. 수평 편파일 때의 수신 특성
Fig. 10a. Receiving characteristics for TE polarization

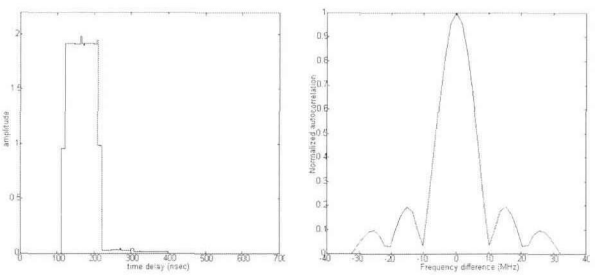


그림 10b. 수직 편파일 때의 수신 특성
Fig. 10b. Receiving characteristics for TM polarization

2장에서 전파가 수평 편파일 때와 수직 편파일 때 벽의 특성이 달라진다는 것을 보았다. 즉, 같은 각도로 전파가 입사된다고 해도 그 전파의 편파 특성에 따라 투과 및 반사 계수의 크기와 위상은 다르게 된다. 따라서 같은 전파 경로를 통해 수신기에 수신되더라도 편파에 따라 수신 전파들은 다른 크기와 위상을 가진다. 그림 10에서 알 수 있듯이 수평 편파일 때는 신호들의 상쇄 간섭으로 인해 수신 신호가 작아졌고, coherence bandwidth도 6.17MHz로 작게 나타난 반면 수직 편파의 경우는 신호들의 보강 간섭으로 수신 신호가 커졌으며 coherence bandwidth도 12.55MHz로 크게 나타났다.

3. 채널 특성 분석

앞에서 구한 수신기의 volt scale의 충격응답 r(t)로부터 펄스를 보냈을 때 수신기의 수신 파워가 지연 시간 t에 따라 어떻게 변하는 지를 나타내는 multipath intensity profile s(t)는 식(5)와 같이 정의된다.

$$s(t) = \frac{r^2(t)}{\eta} \times \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{5}$$

여기서 η 는 임피던스를 나타내고, $\frac{\lambda^2}{4\pi}$ 는 안테나의 cross section을 나타낸다. 본 논문에서는 수신 파워의 절대적인 값보다는 상대적인 값을 통해 채널을 분석하고 있으므로, 계산상의 편의를 위해 $\frac{\lambda^2}{\eta 4\pi}$ 을 1로 정규화 시켰다.

다중 경로 채널은 mean excess delay, rms delay spread의 두 가지 파라미터로 분석될 수 있다. Mean excess delay는 첫 번째로 도달한 신호를 기준으로 한 평균 전파 지연 시간을 말하며, 시간의 원점에 따라 mean excess delay가 달라지는데, 여기서는 power delay profile의 첫 rising edge를 시간의 원점으로 정의한다. 이것은 multipath intensity profile s(t)로부터 식(6)와 같이 구할 수 있다[6].

$$\bar{\tau} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t\, s(t)\, dt}{\int_{-\infty}^{\infty} s(t)\, dt} \tag{6}$$

rms delay spread는 mean excess delay를 기준으로 power delay profile이 어느 정도 퍼져 있는가를 말하며, 부호간 간섭 현상을 피할 수 있도록 전송 속도를 결정하는데 매우 중요한 파라미터이다. rms delay spread σ는 식 (7)과 같이 정의된다[6].

$$\sigma^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t-\bar{\tau})^2 s(t)\, dt}{\int_{-\infty}^{\infty} s(t)\, dt} \tag{7}$$

각각의 경우들에 대해 구한 채널 파라미터는 표 2와 같다.

V. 결 론

본 논문에서는 수신기로부터 원거리에 위치한 송신기로부터 나온 전파가 건물 근처에 도달할 때는 평면파의 형태로 도달한다는 가정 하에 전파 추적 기법을 이용해 수신기와 송신기간의 채널 특성을 분석하였다. 수신 특성을 분석해 본 결과 전파 자체의 세기 감쇠 뿐 아니라 다중 경로를 통해 발생된 여러 개의 전파의 간섭 패턴 역시 수신 특성에 많은 영향을 미쳐 수신 전파의 위상 역시 중요하다는 것을 알 수 있었고, 송신기의 위치 및 수신기의 위치 뿐 아니라 전파의 편파도 수신 특성에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 본 모의 실험을 통해 분석된 채널 특성을 바탕으로 시확산 및 부호간의 간섭을 제거할 수 있는 효율적인 기술의 구현이 가능하리라고 기대된다.

표 2. 채널 파라미터 분석 결과

Table 2. The result of the analysis of channel parameter

		Mean excess delay [nsec]		Rms delay spread [nsec]	
Polari-zation	Incident Angle	Avg.	Std. Dev.	Avg.	Std. Dev.
TE	45°	73.28	19.48	48	14.3
	135°	66.05	14.29	41.66	13.1
	225°	76.43	20.81	45.98	13.3
	315°	69.8	13.76	43.14	12.46
TM	45°	60.71	17.67	36.76	10.49
	135°	54.82	7.42	33.24	6.3
	225°	63.78	16.87	37.2	12.27
	315°	60.75	11.02	36.96	10.77

참 고 문 헌

[1] W. Honcharenko and H. L. Bertoni, "Mechanism Governing UHF Propagation on Single Floors in Modern Office Building," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 41, no. 4, pp. 496-504, Nov. 1992.

[2] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "Site-Specific Propagation Prediction for Wireless In-building Personal Communication System Design," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 879-891, Nov. 1994.

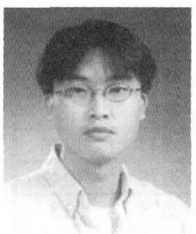
[3] S. C. Kim, "Prediction Model of Wave Propagation Inside Building Including Specular and Diffracted Transmission and Reflection," *한국통신학회논문지*, vol. 23, no. 6, pp. 1592-1601, June 1998.

[4] D. K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, Addison Wesley, 2nd ed., 1989.

[5] C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics, Wiely, 1989.

[6] S. C. Kim, H. L. Bertoni and M. Stern, "Pulse Propagation Characteristics at 2.4 GHz Inside Buildings," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 45, no. 3, pp. 579-592, Aug. 1996.

저 자 소 개



곽 도 영 (郭 度 榮)

1999년 : 서울대학교 전기공학부 졸업 (학사)
현재 : 서울대학교 전기 · 컴퓨터 공학부 석사 과정
주관심분야 : ray tracing, 채널 측정

이 종 호 (李 宗 浩)

1999년 : 서울대학교 전기공학부 졸업 (학사)
현재 : 서울대학교 전기 · 컴퓨터 공학부 석사 과정
주관심분야 : 전력선 통신 채널

김 성 철 (金 成 哲)

1984년 : 서울대학교 전기공학과 졸업 (학사)
1987년 : 서울대학교 전기공학과 졸업 (석사)
1995년 : Polytechnic University 졸업 (박사)
현재 : 서울대학교 전기 · 컴퓨터 공학부 조교수
주관심분야 : 전파 전파, 통신 채널 모델링

최 준수 (崔 準 洙)

1984년 : 서울대학교 전기공학과 졸업 (학사)
1986년 : 한국과학기술원 전산학과 졸업 (석사)
1995년 : New York University 전산학과 졸업 (박사)
현재 : 국민대학교 컴퓨터학부 조교수
주관심분야 : 알고리즘, 컴퓨터 그래픽스